INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2019 • N.º 509 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL TEST CUÁNTICO DEFINITIVO

Varios experimentos descartan las variables ocultas como explicación del entrelazamiento

BIOLOGÍA
La teoría neutralista de la evolución molecular celebra 50 años

MATEMÁTICAS
¿Tiene el pensamiento matemático un lenguaje propio?

GEOLOGÍA
El nacimiento de un supervolcán en Chile

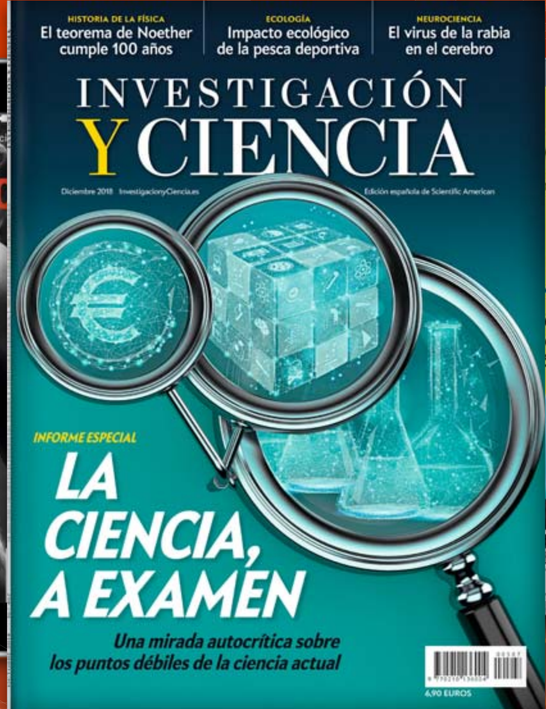




Accede a la HEMEROTECA DIGITAL

TODAS LAS REVISTAS DESDE 1985







Suscríbete a la revista que desees y accede a todos sus artículos

www.investigacionyciencia.es/suscripciones



Encuentra toda la información sobre el desarrollo de la ciencia y la tecnología de los últimos 30 años

Prensa Científica, S.A.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Febrero 2019, Número 509

76

ARTÍCULOS

FÍSICA CUÁNTICA
18 **Acción fantasmal**
Tras cincuenta años de dudas, varios experimentos han acabado para siempre con la posibilidad de dar una explicación clásica al entrelazamiento cuántico.
Por Ronald Hanson y Krister Shalm

ARQUEOLOGÍA
38 **Un fósil humano entre una multitud**
Una nueva técnica que identifica fragmentos diminutos de hueso fósil ayuda a responder preguntas cruciales sobre el momento, el lugar y el modo en que interaccionaron las especies humanas. *Por Thomas Higham y Katerina Douka*

GENÉTICA
52 **La teoría neutralista de la evolución molecular, medio siglo después**
Sigue vigente la teoría que explica con elegancia la gran variación genética que existe en la naturaleza. No obstante, debe ampliarse para incorporar los nuevos conocimientos sobre el funcionamiento del genoma.
Por Antonio Barbadilla, Sònia Casillas y Alfredo Ruiz

MATEMÁTICAS
60 **El nuevo lenguaje de las matemáticas**
La manera en que se conciben términos y símbolos para representar conceptos matemáticos ha ido cambiando a lo largo de la historia. ¿Puede esta disciplina prescindir de las palabras? *Por Daniel S. Silver*



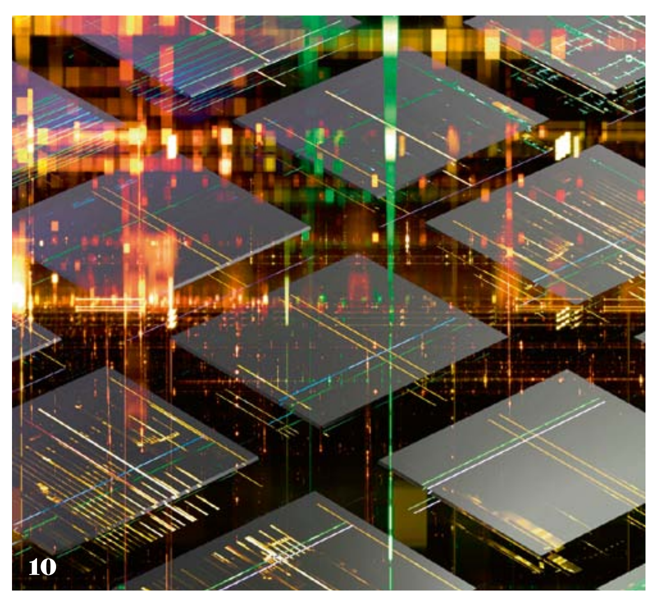
INFORME ESPECIAL
LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO
Comprender las últimas innovaciones y los retos que plantean ayudará a la sociedad a maximizar sus beneficios.
Una colaboración entre Scientific American *y el Foro Económico Mundial.*

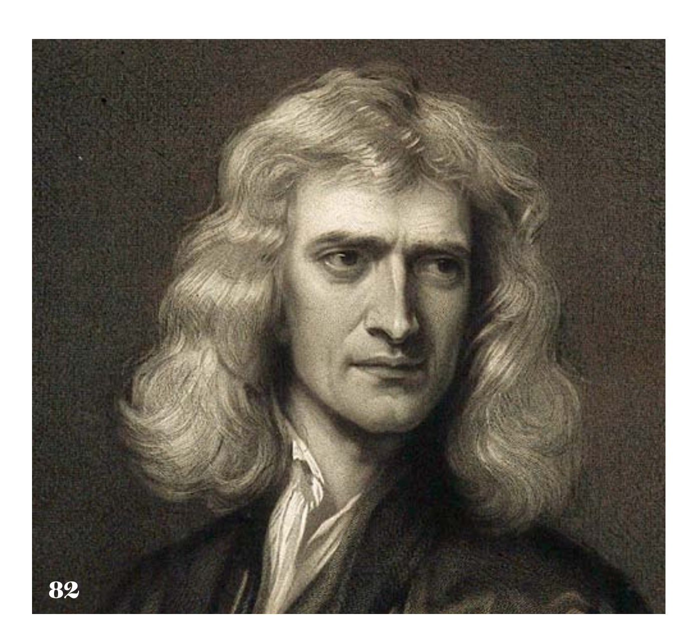
SALUD
68 **La endometriosis, un misterio doloroso**
Esta enfermedad, que se extiende por el cuerpo como la hiedra causando fuertes dolores y esterilidad, afecta a unos 176 millones de mujeres en el mundo. A la ciencia le ha resultado difícil abordarla, pero los nuevos avances han despertado la esperanza de lograr pronto mejores tratamientos. *Por Jena Pincott*

GEOLOGÍA
76 **Infierno oculto**
Bajo la superficie de Chile podría estar gestándose un supervolcán. Su interior frío está trastocando nuestras ideas sobre cómo se desencadenan las mayores erupciones del planeta. *Por Shannon Hall*

ANGIE DIEFENBACH, SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS







INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Personalidad asesina. Cámara crustácea.
La hierba no es tan verde. Detectar mentiras
con inteligencia artificial.

9 Agenda

10 Panorama
Simular la dinámica molecular mediante fotones.
Por Fabien Gatti
Estrategias para mejorar la formación de los profesores
de ciencias. *Por Joshua Hatch*
Un púlsar de 2,3 masas solares. *Por Manuel Linares,
Tariq Shahbaz y Jorge Casares*

46 De cerca
Hongos que habitan líquenes.
Por Sonia Merinero Mesa

48 Historia de la ciencia
Artesanos, técnicos y prácticos.
Por Antonio Sánchez

50 Foro científico
Consumo de carne y cáncer.
Por Rosaura Farré

82 Correspondencias
Newton, Halley y los *Principia*.
Por José Manuel Sánchez Ron

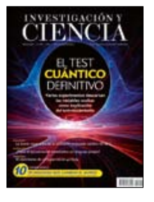
88 Juegos matemáticos
Sucesiones meta-Fibonacci.
Por Bartolo Luque

90 Curiosidades de la física
Inversión temporal para la telefonía 5G.
Por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

93 Libros
Confusión cuántica. *Por Carlos Sabín*
Las grandes preguntas de la geología. *Por Luis Alonso*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA



En 1935 Einstein sugirió que las extrañas propiedades de la mecánica cuántica podrían deberse a la existencia de «variables ocultas». Hasta hace poco, sin embargo, todos los intentos de poner a prueba esa idea habían adolecido de alguna imperfección experimental. Esas deficiencias se han subsanado hace poco: los resultados descartan de manera concluyente la existencia de variables ocultas y abren la puerta a nuevas tecnologías cuánticas. Ilustración de Jaswe/iStock

redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto y octubre de 2018

EL MISTERIO DE LA CONSCIENCIA

Las salvas contra Daniel Dennett lanzadas por Christof Koch en «¿Qué es la consciencia?» [Investigación y Ciencia, agosto de 2018] yerran el tiro. Su argumento básico es: (1) Dennett, motivado por la creencia de que vivimos en «un universo material e irrelevante», niega que podamos tener experiencias conscientes; (2) siento dolor de muelas; (3) por tanto, Dennett está equivocado.

Quienes hayan leído bien a Dennett reconocerán la falsedad de la premisa inicial. Dennett entiende la realidad del dolor; su objetivo es fomentar la cautela al teorizar sobre nuestra propia consciencia: dada la complejidad del cerebro humano, cabe esperar que algunas de nuestras intuiciones sobre su funcionamiento estén equivocadas.

Christopher Taylor
Madison, Wisconsin

Responde Koch: *En su libro de 1991* Consciousness explained, *Dennett argumenta que las personas están terriblemente confundidas al respecto. Lo que quieren decir cuando relatan sus experiencias —porque eso es la conciencia— es que poseen ciertas creencias sobre sus estados mentales; cada estado presenta unas propiedades funcionales distintas y comportamientos diferentes. Una vez explicados estos resultados, ya no quedaría nada más por explicar: la consciencia es cuestión de actos.*

Esa visión materialista y eliminadora niega la existencia de todo lo que vaya más allá de la función y de las disposiciones de comportamiento asociadas, y me resulta extrañamente incongruente con mi experiencia. ¿Cómo puede ser mi dolor de espalda una creencia y no un atroz estado subjetivo? Tras haber cenado innumerables veces con Dennett, uno de los filósofos más elocuentes y eruditos que conozco, puedo afirmar que fuera del horario laboral actúa como si tuviera experiencias, al igual que los demás.

¿MATERIA OSCURA INDETECTABLE?

En «¿Es real la materia oscura?» [Investigación y Ciencia, octubre de 2018] Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh comparan dos hipótesis que explicarían el movimiento de las estrellas en las galaxias y el de estas en los cúmulos: una postula la existencia de partículas invisibles (materia oscura), otra altera la descripción matemática de la interacción gravitatoria (gravedad modificada).

La relatividad general de Einstein establece que la gravedad no es más que una fuerza aparente que resulta de la curvatura del espaciotiempo, la cual es a su vez causada por la presencia de masa. ¿Podría ocurrir que hubiese otras cosas (en particular, la energía oscura) que generasen el mismo efecto? ¿Sería posible que el efecto distorsionador de la energía oscura a escalas galácticas provocase una especie de «burbujeo» local del espaciotiempo?

Keith Backman
Bedford, Massachusetts

Me sorprende que los autores no tuviesen nada que decir sobre la influencia de los objetos más oscuros que existen: los agujeros negros. En concreto, la ausencia de un pico de densidad de materia oscura en el centro de las galaxias podría deberse a la existencia de un gran agujero negro que engullese la materia oscura circundante.

Peter J. Turchi
Santa Fe, Nuevo México

Una característica asociada a la materia oscura es que interacciona muy poco con la materia ordinaria. Pero ¿podría ser esa interacción completamente nula? En tal caso la materia oscura existiría, pero no habría forma de detectarla. ¿Hay alguna formulación que dé forma a este supuesto?

Alberto Bellido de la Cruz
Zaragoza

Responden los autores: *Con respecto a la pregunta de Backman, la teoría de la gravedad de Einstein dicta que la masa y la energía de cualquier tipo curvan el espaciotiempo. De hecho, la energía oscura sí afecta a la curvatura, solo que no produce los mismos efectos que se le atribuyen a la materia oscura. En realidad, «energía oscura» y «materia oscura» no son más que nombres que los físicos han dado al fenómeno que creen que causa las observaciones, por lo que a cada una se le asignan propiedades diferentes. La energía oscura es la responsable de la expansión acelerada del universo, y su influencia en el interior de las galaxias resulta minúscula.*

A Turchi: El centro de la Vía Láctea aloja un agujero negro supermasivo de cuatro millones de masas solares que calienta el gas que cae en él. Pero, por impresionante que parezca, nada de eso afecta al movimiento general de la galaxia. El agujero negro solo influye en lo que sucede en las regiones más internas, y su masa es muy inferior a la cantidad de materia oscura que hace falta postular para explicar las observaciones.

A Bellido de la Cruz: Sabemos que la materia oscura interactúa gravitacionalmente con la materia normal, por lo que la interacción entre ambas nunca puede ser nula. Sin embargo, si la única interacción entre ellas fuese la gravitatoria —algo compatible con las observaciones disponibles hasta ahora—, las partículas de materia oscura no podrían detectarse por medios directos. Por tanto, los físicos no invierten demasiado tiempo en esta opción: es demasiado deprimente. En su lugar, prefieren escribir artículos sobre partículas que sí puedan detectarse o, mejor aún, producirse en un acelerador de partículas.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



A LAS ORCAS se las puede evaluar por rasgos como la extroversión o la dominancia.

GETTY IMAGES

COGNICIÓN ANIMAL

Personalidad asesina

A pesar de su lejanía evolutiva, las orcas y los chimpancés muestran rasgos de la personalidad asombrosamente similares

A todo aquel que haya cursado estudios de psicología o haya completado algún test virtual le sonarán los «cinco grandes» rasgos de la personalidad: apertura a lo nuevo, responsabilidad, extroversión (o sociabilidad), amabilidad e inestabilidad emocional (o neuroticismo). Si, por ejemplo, uno se identifica con la afirmación «Hablo con gente de todo tipo en las fiestas», podría arrojar una puntuación alta en extroversión. Se cree que la personalidad del individuo es bastante estable en la edad adulta, y la idea de que pueda ser medida con un número reducido de factores se remonta al menos a hace un siglo.

Pero la humana no es la única especie cuya personalidad se presta a la cuantificación; los cuidadores de zoológicos, refugios de fauna y otros centros de cría en cautividad evalúan con frecuencia la personalidad de los animales, a lo largo de meses o años de observación y de relación con ellos. Las características del test varían de una especie a otra (por ejemplo, a los tritones se les puede valorar por su libido, y a los peces cebra y los macacos de la India, por su osadía), pero la idea de que es posible describir la personalidad con un pequeño conjunto de factores sigue siendo la misma. Ahora las investigaciones apuntan a que animales tan dispares como el chimpancé y la orca muestran perfiles de personalidad sorprendentemente similares.


BOLETINES A MEDIDA
Elige los boletines según tus preferencias temáticas y recibirás toda la información sobre las revistas, las noticias y los contenidos web que más te interesan.
www.investigacionyciencia.es/boletines



LOS CHIMPANCÉS comparten con nuestra especie los «cinco grandes» rasgos de la personalidad, más un sexto.

Un equipo de investigación dirigido por Drew Altschul, primatólogo de la Universidad de Edimburgo, ha reunido evaluaciones de la personalidad de chimpancés a lo largo de un cuarto de siglo. Después de someter los datos de 538 chimpancés a un modelo estadístico, Altschul y sus colaboradores han descubierto que la personalidad de este simio puede reducirse a los mismos cinco rasgos aplicables a los humanos, más un sexto denominado dominancia, que refleja la destreza competitiva y la competencia social de los grandes simios. Los resultados se publicaron el pasado octubre en la revista virtual *eLife*.

Que el chimpancé y el ser humano compartan perfiles de personalidad similares no deja de tener cierto sentido, puesto que ambos guardan lazos estrechos. Pero ¿qué puede decirse de parientes más lejanos? La primatóloga Yulán Úbeda, de la Universidad de Gerona, andaba hace poco preparando una conferencia para el personal del zoológico Loro Parque, de las islas Canarias. Quiso comprobar si se había hecho algún estudio de la personalidad con orcas, una de las grandes atracciones del parque. «No solo no había estudios sobre su personalidad», afirma, sino que los únicos llevados a cabo en cetáceos se limitaban al delfín mular, y en ellos no se usaron técnicas estadísticas para reducir las medidas de la personalidad a unos pocos factores. Úbeda pidió a los entrenadores y a los investigadores a cargo del cuidado de 24 orcas en tres centros de España y EE.UU. que completaran un cuestionario concebido en un principio para evaluar la personalidad del chimpancé (distinto al de Altschul).

La personalidad de la orca se divide en cuatro rasgos, según el estudio de Úbeda, que vio la luz el noviembre pasado en *Journal of Comparative Psychology*. Los tres primeros son extroversión, dominancia y prudencia; el cuarto puede considerarse una combinación de responsabilidad y amabilidad. Cuando la científica comparó esos resultados con los de su investigación precedente con chimpancés, halló que la composición de la personalidad de las dos especies era bastante similar (aunque la personalidad del chimpancé se compone de seis factores, no de cuatro).

A la vista de las diferencias tanto en el hábitat como en la neuroanatomía de las ballenas y los chimpancés, por no mencionar los 94 millones de años que les separan de evolución, Úbeda confiesa que no esperaba que los rasgos de la personalidad de los dos coincidieran tanto entre sí, ni tampoco con los de los humanos. Aun así, «hay algo en su entorno social que ha contribuido a esa semejanza», opina Justin Gregg, investigador del Proyecto de Comunicación del Delfín, ajeno al estudio. Según él, el chimpancé y la orca se caracterizan por una cognición compleja, un cerebro voluminoso respecto al peso corporal y el aprendizaje cultural (rasgos que también presenta nuestra especie), aparte de unas estructuras sociales parecidas.

Entender la personalidad no es solo un ejercicio intelectual. En la especie humana existe un vínculo conocido entre la personalidad y la esperanza de vida, y Altschul ha hallado una pauta análoga en el chimpancé. «El principal hallazgo es que los machos que destacan por su amabilidad viven más que los que no lo son tanto», afirma. Los chimpancés tienen una reputación de agresividad, pero los individuos que son «simpáticos, serviciales, sensibles, protectores y gentiles» tienden a ser más longevos, explica. Altschul manifiesta prudencia y señala que es una mera correlación estadística: hasta hoy se ignora la relación subyacente entre la personalidad y la longevidad en los grandes simios.

El psicólogo de la Universidad Duke Paul Costa, que no ha participado en el estudio anterior, destaca la relevancia de la cultura humana en el aumento de la esperanza de vida y apunta al posible efecto de la cautividad a la hora de explicar los resultados de los chimpancés. «La principal dimensión de la personalidad relacionada con la longevidad humana es la responsabilidad, una asociación que no se ha constatado en esta población de chimpancés», explica. Ese vínculo en los humanos tal vez se relacione con los hábitos de salud. «Las personas más responsables practican más ejercicio, vigilan lo que comen, no fuman y no beben en exceso», explica. Pero en cautividad, «incluso los chimpancés más desidiosos disfrutan de una buena alimentación y de atención veterinaria», matiza Costa, «sean responsables o no.»

—Jason G. Goldman

K & K AMMAN, GETTY IMAGES

BIOIMITACIÓN

Cámara crustácea

Un nuevo artefacto imita la asombrosa visión de la galera

La galera, o gamba mantis, ostenta el título de ser el púgil más temible del reino animal: su golpe es lo bastante fuerte como para romper la concha de los moluscos o el vidrio de un acuario. También podría jactarse de poseer uno de los ojos más extraordinarios y complejos del planeta. El ojo humano cuenta con tres tipos de células fotorreceptoras; este crustáceo presenta una docena, lo que le permite captar propiedades de la luz que escapan a la visión de otros animales.

Ingenieros de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign han creado una cámara que reproduce estrechamente su agudísimo sentido de la vista. Descrito el pasado octubre en *Optica*, el aparato consiste en un cubo de unos 2,5 centímetros que según sus inventores podría ser fabricado en masa a 10 dólares la unidad. Creen que a la larga permitirá que los automóviles detecten peligros, los drones militares reconozcan objetivos camuflados o ensombrecidos y los cirujanos operen con mayor precisión.

La galera posee dos superpoderes visuales. El primero es la percepción de la luz polarizada, aquella que vibra en un mismo plano (la luz no polarizada vibra en todas direcciones). La luz reflejada por los objetos siempre contiene una componente polarizada, una propiedad que revela objetos que de otro modo se confundirían con el fondo; la galera recurre a ella para hallar presas en las azuladas aguas marinas. El segundo es su capacidad para detectar un extenso abanico, o margen dinámico, de intensidades de luz, lo que le permite ver con contrastes intensos, con áreas muy brillantes y muy oscuras a la vez.

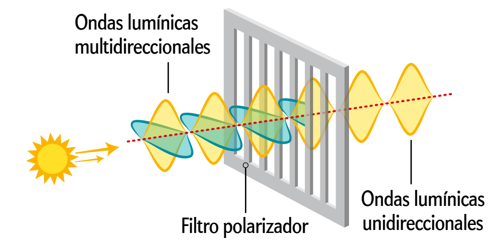
La nueva cámara reproduce ambas facultades. El ingeniero informático y electrónico Viktor Gruev y sus colaboradores fabricaron una matriz de minúsculos fotodetectores de silicio similares a los incorporados en las cámaras de polarización comerciales. Pero, a diferencia de los detectores clásicos, que generan una corriente eléctrica que aumenta linealmente con la intensidad lumínica, los nuevos detectores responden de forma exponencial. Esto se traduce en un margen dinámico unas 10.000 veces mayor que las cámaras comerciales actuales. Los investigadores también cubrieron los detectores con hilos microscópicos de aluminio para imitar las microvellosidades, las estructuras tubulares del ojo de la galera que filtran y captan la luz polarizada.

En una prueba en condiciones reales, el equipo condujo por las calles un vehículo provisto de la nueva cámara y de otro modelo clásico. Las imágenes de la cámara dotada con un «ojo de galera» mostraban un contraste muy superior, sobre todo en condiciones de niebla o de lluvia y en situaciones con multitud de luces y sombras, explica Gruev.

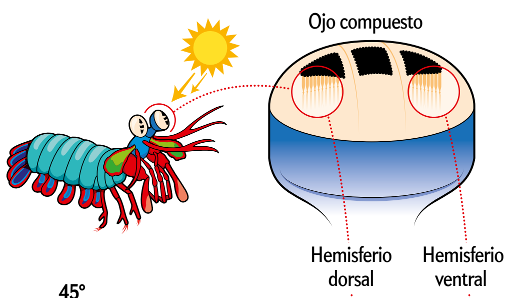
La galera es el único animal capaz de percibir un espectro completo de colores y polarización, asegura Thomas Cronin, profesor de ciencias biológicas en la Universidad de Maryland, que no ha formado parte del estudio. Esas virtudes la convierten en un modelo ideal para una cámara, explica: «Permitiría obtener imágenes nítidas de objetos sobre un fondo complejo que son difíciles de captar con otras técnicas».

—Prachi Patel

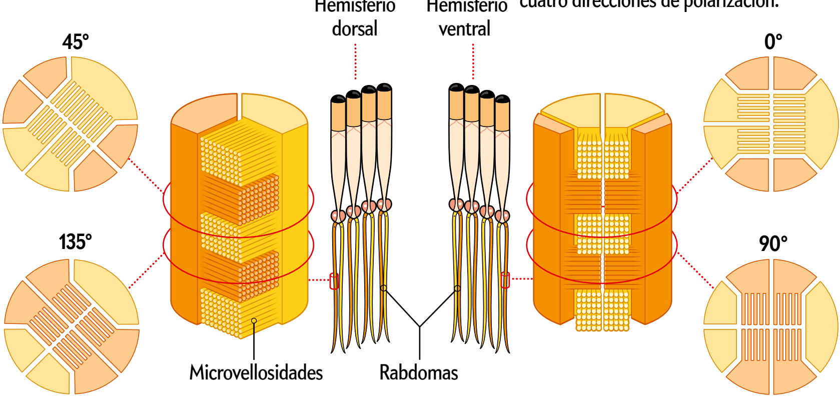
Así imita la cámara el ojo de la galera

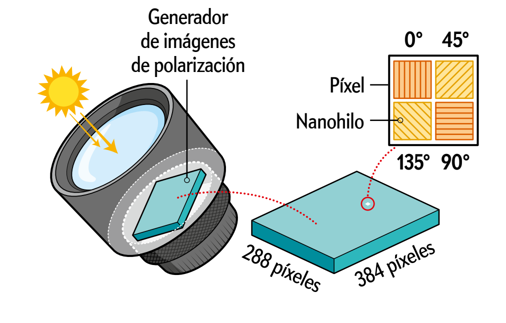


LUZ POLARIZADA
La luz solar está compuesta por ondas que vibran en todas direcciones. Las ondas de la luz polarizada vibran en un solo plano.



EL OJO DE LA GALERA
Cada «píxel» del ojo compuesto de la galera presenta una estructura, el rabdoma, formado por fotorreceptores provistos de haces de filamentos (microvellosidades) apilados alternativamente en ángulo recto. Las células de los dos hemisferios del ojo están inclinadas 45° unas respecto a otras. De ese modo, los ojos pueden distinguir cuatro direcciones de polarización.





CÁMARA INSPIRADA EN LA GALERA
El nuevo sensor de píxeles consiste en una matriz de detectores de silicio cubiertos con nanohilos de aluminio orientados 45° unos respecto a otros que imitan las microvellosidades captadoras de la luz polarizada de la galera. Cada detector de silicio convierte exponencialmente la luz en corriente eléctrica, lo que permite a la cámara captar un amplio abanico de intensidades lumínicas.

FUENTE: «BIOINSPIRED POLARIZATION IMAGER WITH HIGH DYNAMIC RANGE», MISSAEL GARCIA ET AL. EN *OPTICA*, VOL. 5, N.º 10; 20 DE OCTUBRE DE 2018; BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*)

SOSTENIBILIDAD

La hierba no es tan verde

Varios expertos abogan por reemplazar el césped urbano por alternativas más sostenibles

En numerosos vecindarios y parques de todo el mundo abundan las extensiones de hierba bien cuidadas. Pero, a pesar de su valor estético, el césped merma la biodiversidad, y su mantenimiento puede requerir prácticas cuestionables desde el punto de vista ambiental. En las zonas secas de EE.UU., por ejemplo, tres cuartas partes del agua para uso doméstico se emplean para regar el césped. A medida que el cambio climático apremia, estos terrenos cubiertos de hierba no hacen más que empeorar las cosas.

Cada vez son más los investigadores, urbanistas y paisajistas que contemplan alternativas más sostenibles. En un artículo publicado el pasado mes de octubre en *Science*, los investigadores Maria Ignatieva y Marcus Hedblom describen los inconvenientes de las tradicionales praderas de césped y discuten opciones para sustituirlas. Ignatieva, directora del programa de arquitectura del paisaje de la Universidad de Australia Occidental, explica sus razones en la siguiente entrevista. —*Annie Sneed*

¿Por qué se hizo tan popular el césped?

El césped llegó a considerarse un emblema de la civilización y de un estilo de vida. Era una especie de frontera que separaba las ciudades y los pueblos de las zonas agrestes, y siempre constituyó un símbolo de cómo debería ser una sociedad civilizada. Por eso tenía tanta fuerza. Y, por supuesto, tiene también un valor recreativo. Sin embargo, el césped es artificial: no existe en la naturaleza. Tiene parientes cercanos, como los prados o los pastizales. Esos ecosistemas poseen estructuras similares, pero son mucho más diversos y en ellos la densidad de la hierba es menor.

¿Qué problemas ambientales está provocando el césped?

El césped está homogeneizando el entorno; no solo en términos de biodiversidad, sino también visualmente. Si comparamos los paisajes urbanos de países y ciudades de todo el mundo, todos tienen exactamente el mismo aspecto.

A diferencia de una superficie dura, como el cemento o el asfalto, el césped puede ofrecer muchos servicios ecosistémicos: absorbe carbono atmosférico, produce oxígeno y previene la erosión. Pero su mantenimiento requiere recursos: agua, abonos, plaguicidas y herbicidas, que pasan al agua subterránea, y máquinas cortacésped que queman combustibles fósiles y emiten gases que calientan la atmósfera.

Y no todos los países disponen de medios para mantener el césped, sobre todo en ambientes secos. Hay alternativas que pueden proporcionar los mismos servicios ecosistémicos con menos recursos.

¿Qué alternativas?

Debemos encontrar nuestra propia solución local, para lo cual podemos inspirarnos en las comunidades naturales de plantas que nos rodean. En áreas suburbanas y rurales, eso podría significar tener un prado o un pastizal. En otros lugares, un entorno similar a la sabana o plantas de montaña. También podemos optar por un «césped sin hierba», formado por plantas que no crezcan demasiado, produzcan el mismo efecto que el césped y sobre las que también podríamos caminar.

La gente está muy acostumbrada al césped verde como símbolo de riqueza, pero es hora de apreciar la naturaleza tal y como es, dando cabida a otro abanico de colores, apariencias y funciones. Se trata de conseguir un paisaje heterogéneo en vez de uno homogéneo; de los beneficios de acercar la naturaleza a las personas y hacer la vida más fácil, sostenible y económica.

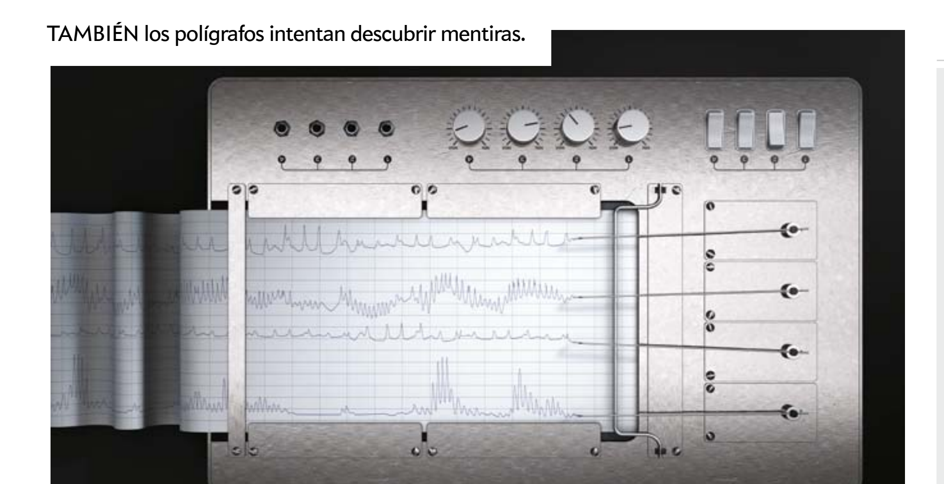
¿Cómo convencer a la gente de que adopte esas alternativas?

Cuando la gente las ve, las valora y las encuentra atractivas. Así que es solo una cuestión de educación. También tenemos que tratar de cambiar la mentalidad de las autoridades, políticos incluidos. Necesitamos mostrarle a la gente que existen otras maneras de gestionar y mejorar nuestro entorno urbano.



JAMES BREY/GETTY IMAGES

TAMBIÉN los polígrafos intentan descubrir mentiras.



APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

Detectar mentiras con inteligencia artificial

Un algoritmo de la Policía española permite identificar denuncias falsas

El Cuerpo Nacional de Policía español acaba de incorporar a un nuevo miembro: una herramienta de inteligencia artificial llamada VeriPol. Se trata del primer sistema basado en texto que ha sido diseñado para detectar denuncias de robo falsas. Según los investigadores, funciona con una exactitud asombrosa.

Hace unos años, cuando Miguel Camacho Collados era inspector de policía en Granada, le frustraba lo muy a menudo que su equipo debía vérselas con denuncias de atraco que luego resultaban ser inventadas. «Muchos compañeros perdían tiempo investigando casos que no habían ocurrido nunca», explica Camacho, que ahora trabaja en el Ministerio del Interior.

Las personas simulan robos por varias razones: hay quienes simplemente desean no tener que decirle a la familia que han perdido algo valioso, pero otros buscan cobrar del seguro, apunta Camacho. Hasta hace poco, la única forma de desenmascararlos era que un agente experto revisase las denuncias sospechosas; sin embargo, este método no siempre funciona. Así las cosas, Camacho, que también es matemático, y otros científicos crearon un algoritmo con la intención de que identificase denuncias falsas analizando la manera en que estaban redactados los informes.

Los investigadores entrenaron a VeriPol con un total de 1122 denuncias correspondientes a casos cerrados, en los que o bien el atracador había sido condenado o bien el denunciante había confesado su mentira. Después, presentaron al algoritmo una muestra de 659 denuncias y compararon sus aciertos con los obtenidos por dos expertos humanos. VeriPol superó a ambos en un 15 y un 20 por ciento, respectivamente. Los resultados, publicados el pasado mes de junio en *Knowledge-Based Systems*, han permitido asimismo entender un poco mejor cómo mienten las personas a la Policía. Por ejemplo, las denuncias fraudulentas tienden a describir un determinado *modus operandi* (el atracador suele asaltar por detrás o llevar puesto un casco), usan frases más cortas y ofrecen poca información sobre el incidente.

VeriPol ya se está utilizando con éxito en España. Un ensayo piloto realizado en junio de 2017 en Murcia y en Málaga detectó, respectivamente, 25 y 39 falsos atracos en tan solo una semana: bastantes más que los 3 y 12 identificados durante ese mes a lo largo de los diez años previos.

William Wang, teórico de la computación de la Universidad de California en Santa Bárbara que no participó en el trabajo, cree que el éxito de VeriPol podría replicarse en otros países, sobre todo en aquellos en los que las comisarías anden cortas de personal. Camacho espera que el algoritmo pueda generalizarse pronto a otros delitos que también se simulan a menudo, como los robos en casa o el hurto de coches. Por ahora, dice, el mensaje está claro: «La gente se lo pensará dos veces antes de presentar una denuncia falsa».

—*Emiliano Rodríguez Mega*

ALLAN SWART, GETTY IMAGES (*polígrafo*); PARQUE DE LAS CIENCIAS DE GRANADA (*reptil*)

AGENDA

CONFERENCIAS

13 de febrero
Científicas «elementales» en la historia de la tabla periódica
Adela Muñoz Páez,
Universidad de Sevilla
Facultad de Ciencias Experimentales
Universidad de Jaén
Jaén
facexp.ujaen.es

14 de febrero
Alicia en el País de las Maravillas: Los extraños mecanismos entre el género fantástico y las matemáticas
Carlos Gámez Pérez,
Universidad de Navarra
Auditorio Josep Irla
Gerona
catedra.clinicabofill.net

14 de febrero
La eclosión de la astronomía en la Edad Moderna
Rafael Bachiller, Observatorio Astronómico Nacional
Museo Arqueológico Nacional
Madrid
www.man.es

EXPOSICIONES

Somos naturaleza
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat

Anfibios y reptiles ibéricos
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



OTROS

Hasta el 8 de febrero — Concurso
Fotciencia
Concurso de fotografía científica
Convocan: CSIC y FECYT
www.fotciencia.es

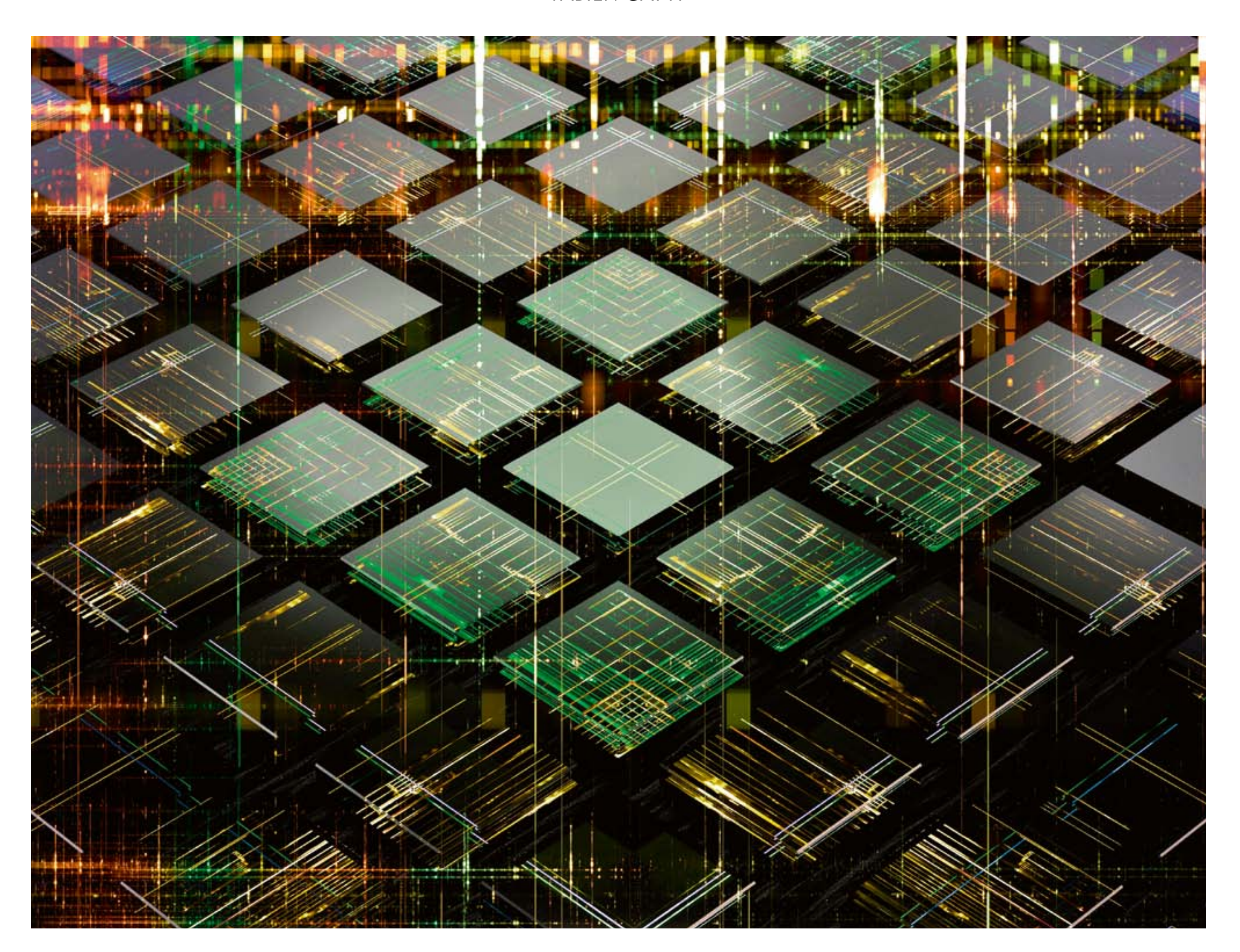
Hasta el 15 de febrero (inscripciones)
Apadrina un elemento
Concurso multimedia para estudiantes de secundaria
Convoca: Real Sociedad Española de Química (sec. Alicante)
www.rseqalicante.es

SIMULACIÓN CUÁNTICA

Simular la dinámica molecular mediante fotones

El comportamiento de las moléculas resulta muy difícil de modelizar con ordenadores tradicionales porque responde a fenómenos cuánticos. Un nuevo chip fotónico ha demostrado ser una plataforma versátil para su estudio

FABIEN GATTI



COMPUTACIÓN CON PARTÍCULAS DE LUZ: Un nuevo dispositivo cuántico ha conseguido modelizar la evolución temporal de varios procesos moleculares a partir de las superposiciones cuánticas de estados fotónicos. El hito augura la posibilidad de diseñar de procesos químicos mucho más eficientes que los actuales (*recreación artística*).

© NIPLOT/ISTOCKPHOTO

Los dispositivos de computación cuántica podrían superar algún día a los ordenadores tradicionales, sobre todo en lo referente a la simulación de sistemas cuánticos. Tales máquinas comparten su naturaleza cuántica con los sistemas que tratan de simular, por lo que gozan de una ventaja intrínseca a la hora de describirlos. En un artículo publicado hace poco en *Nature*, Chris Sparrow, de los Laboratorios de Ingeniería y Tecnologías Cuánticas de la Universidad de Bristol, y otros colaboradores han presentado un chip fotónico capaz de simular con éxito varios procesos cuánticos asociados a diferentes moléculas. Los resultados muestran un excelente acuerdo con las simulaciones efectuadas con ordenadores corrientes, lo que reafirma el potencial de la tecnología cuántica en este campo.

En química industrial, el rendimiento de un proceso suele optimizarse controlando variables macroscópicas como la

temperatura y la presión. Sin embargo, trabajar a temperaturas y presiones elevadas conlleva el consumo de grandes cantidades de energía, así como la generación de subproductos contaminantes no deseados. Para evitarlo, un prometedor método de optimización se basa en explotar la naturaleza cuántica de las moléculas que intervienen en la reacción.

Uno de los aspectos clave de la mecánica cuántica es el principio de superposición. Este afirma que los posibles estados cuánticos de un sistema pueden sumarse y el resultado será otro estado cuántico posible. El aspecto no clásico de dicho principio se hace manifiesto en los bits cuánticos, o qubits, los cuales pueden existir en una superposición simultánea de los estados 0 y 1. En un qubit, la superposición de tales estados presenta una propiedad conocida como coherencia cuántica. Eso significa que ambos quedan relacionados entre sí de una manera imposible de obtener en física clásica.

La capacidad de controlar la coherencia cuántica constituye uno de los principales retos científicos y tecnológicos de hoy en día, ya que permitiría desde sintetizar materiales de gran interés, como los superfluidos (fluidos que discurren sin resistencia), hasta construir ordenadores cuánticos funcionales. Pero, además, ello podría dar lugar a procesos químicos mucho más eficientes que los que conocemos hoy.

En química tradicional, los estados cuánticos que participan en un proceso químico no presentan coherencia. Sin embargo, resulta posible obtener superposiciones coherentes de estados moleculares usando láseres. Producir a voluntad tales superposiciones podría mejorar la eficiencia de los procesos químicos, reducir el consumo energético y abrir la puerta a mecanismos de reacción que de otro modo resultarían inaccesibles.

Hoy por hoy, la principal herramienta para manipular moléculas son los pulsos láser. Las recientes mejoras en la generación de estos pulsos, como el aumento de su potencia y la posibilidad de reducir su duración hasta escalas de tiempo de attosegundos (10^{-18} segundos), han permitido mejorar sobremanera el control de los procesos moleculares inducidos por la luz [*véase* «El nacimiento de la attoquímica», por Fernando Martín García; Investigación y Ciencia, enero de 2019]. Desde el trabajo pionero de Ahmed Zewail, galardonado con el premio Nobel en 1999, los

El control de la coherencia en los procesos químicos exige usar modelos precisos de la evolución cuántica de las moléculas

pulsos láser han venido usándose en química para estudiar la coherencia cuántica [*véase* «Microscopía electrónica ultrarrápida», por Ahmed H. Zewail; Investigación y Ciencia, octubre de 2010].

Por ejemplo, la coherencia se ha empleado para aumentar la velocidad de las reacciones químicas en sistemas biológicos a temperatura ambiente. Junto con otros trabajos, ello ha demostrado que resulta posible conservar parcialmente la coherencia incluso en sistemas moleculares que interaccionan con el entorno. Sin embargo, tales avances experimentales requieren modelos precisos de la evolución cuántica de las moléculas. Y aunque en los últimos años se han logrado varios progresos gracias al desarrollo de mejores algoritmos, esta tarea sigue resultando compleja para los dispositivos actuales de computación cuántica.

Calcular con fotones

Sparrow y sus colaboradores han fabricado un dispositivo de computación cuántica basado en un único chip fotónico. En concreto, aprovecharon las superposiciones cuánticas de los fotones para transportar información y modelizar la evolución temporal de diversos sistemas moleculares. Al ajustar los circuitos ópticos del dispositivo, los autores lograron simular una serie de procesos cuánticos asociados a diferentes moléculas.

Los investigadores comenzaron simulando excitaciones vibracionales en varias moléculas de cuatro átomos. También modelizaron el transporte de energía en el enlace químico de una proteína; estudiaron la transferencia de energía vibracional en agua líquida, y pusieron a prueba un algoritmo diseñado para identificar estados cuánticos que pueden conducir a la descomposición del amoníaco. Para comprobar la bondad de los resultados de sus simulaciones, verificaron que estos concordaban casi por completo con los obtenidos mediante ordenadores tradicionales.

A pesar de las prometedoras perspectivas del nuevo trabajo, no es difícil prever algunos de los problemas a los que se enfrentarán las futuras investigaciones en este campo. En este estudio pionero, los autores han usado modelos moleculares sencillos y descritos por expresiones matemáticas con pocos términos. Sin embargo, su número aumentará de manera exponencial al tratar de reproducir en detalle las condiciones experimentales, lo que podría conllevar un incremento drástico de lo que los autores denominan los «errores fundamentales de la fotónica», entre los que se incluyen la fuga de fotones y la pérdida de la coherencia cuántica.

Con todo, al abordar problemas que pueden resolverse mediante técnicas estándar consolidadas, Sparrow y sus colaboradores han demostrado que las simulaciones efectuadas con dispositivos de computación cuántica pueden ser fiables y eficientes. Como señalan los propios autores, cabe esperar que la introducción de ligeras mejoras en su método permita llevar a cabo simulaciones imposibles de lograr con ordenadores clásicos.

Fabien Gatti *trabaja en el Instituto de Ciencias Moleculares de Orsay, perteneciente a la Universidad de París-Sur.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 557, págs. 641-642, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature. Elisabetta Collini et al. en *Nature*, vol. 463, págs. 644-647, 2010.
Control of quantum phenomena: Past, present and future. Constantin Brif, Raj Chakrabarti y Herschel Rabitz en *New Journal of Physics*, vol. 12, art. 075008, 2010.
Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics. Chris Sparrow et al. en *Nature*, vol. 557, págs. 660-667, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Objetivos y oportunidades de la simulación cuántica. J. Ignacio Cirac y Peter Zoller en *IyC*, noviembre de 2012.
Mundos cuánticos simulados. Oliver Morsch e Immanuel Bloch en *IyC*, mayo de 2015.

EDUCACIÓN

Estrategias para mejorar la formación de los profesores de ciencias

Los futuros docentes deberían dedicar más tiempo a las prácticas en clase y aprender a conectar con los alumnos

JOSHUA HATCH



LOS ALUMNOS son los nuevos protagonistas de las tendencias didácticas actuales. Los profesores pasan a un segundo plano, para acompañar a los niños en su camino hacia el descubrimiento.

© GEORGIJEVIC/ISTOCKPHOTO

Si pasas tiempo con criaturas, enseguida te das cuenta de que Carl Sagan tenía razón cuando decía: «Todos los niños nacen científicos...». Si pasas un rato con cualquier estudiante de secundaria, se hace evidente que la segunda parte de la cita de Sagan también es correcta: «...después nosotros se lo extirpamos. Algunos consiguen burlar al sistema y mantienen intactos su asombro y entusiasmo por la ciencia».

Los intentos por cambiar esta dinámica se centran cada vez más en los profesores. Sobre todo, en su formación y en la forma de interactuar con los alumnos. En EE.UU., los Estándares de Ciencias para la Próxima Generación (NGSS, por sus siglas en inglés) desarrollados por el Consejo Nacional de Investigación estadounidense describen el modo en que los docentes pueden suscitar las preguntas de los estudiantes, alimentar su curiosidad y mejorar sus conocimientos sobre los conceptos científicos. Asimismo, las últimas técnicas de formación del profesorado resaltan la importancia de las prácticas en clase para mejorar la enseñanza de las ciencias, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (CTIM o, su equivalente en inglés, STEM).

Los métodos de enseñanza se han basado durante largo tiempo en «la retórica de las conclusiones bien establecidas», según Jonathan Osborne, experto en didáctica de las ciencias de la Universidad Stanford. «El paradigma dominante con el que funciona la mayoría de los profesores es: "Yo sé y tú no sabes, y estoy aquí para comunicártelo y explicártelo". Y el problema es que sabemos que esto no funciona», comenta Osborne.

Ese enfoque no solo desagrada a los estudiantes, sino que puede resultar perjudicial para la sociedad. Un informe de 2013 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología estadounidense expresaba: «Los actuales métodos educativos no están creando una fuerza laboral suficientemente amplia y bien formada en CTIM». El informe culpaba, además, al sistema educativo de no procurar una cultura

básica en CTIM al público general. Como consecuencia, la mitad de quienes quieren estudiar CTIM en la universidad no ha recibido la preparación adecuada en la escuela secundaria, según un informe de 2016 de la organización ACT, que elabora exámenes de acceso a la universidad. Con todo, la demanda para estudiar CTIM se mantiene alta. La Comisión Europea se fijó en 2011 el propósito de añadir un millón de nuevos científicos investigadores para 2020 y, en 2012, el entonces presidente estadounidense Barack Obama estableció el objetivo de aumentar en un millón los graduados en CTIM para 2025. Como respuesta, muchas escuelas de secundaria han ido incrementando sus exigencias en matemáticas y ciencias.

El número de estudiantes de secundaria matriculados en cursos de matemáticas y ciencias aumentó en EE.UU. más del 60 por ciento en veinte años a partir de mediados de la década de 1980, según un estudio de la Universidad de Pensilvania en Filadelfia. Pero estos incrementos no mejoran directamente la enseñanza de CTIM; tan solo añaden más presión al sistema.

Para mejorar los resultados, señala Peter McLaren, director ejecutivo de la iniciativa sin ánimo de lucro Next Gen Education, es necesario un cambio en el aula: pasar del método centrado en el profesor a otro que ayude a los alumnos a trabajar por sí mismos en los conceptos. McLaren colaboró en la redacción de los Estándares de Ciencias para la Próxima Generación. Enseñaba ciencias generales en East Greenwich, Rhode Island, y recuerda una lección que impartió sobre gases. Llevó un frasco de perfume de su exmujer y lo roció enfrente de la clase. «Les dije a los alumnos que levantaran la mano cuando olieran algo», explica. Los chicos participaban animadamente hasta que empezó a explicarles lo que ocurría con las moléculas del gas. El entusiasmo de los estudiantes se esfumó en cuanto empezó su disertación, en plan «os lo voy a explicar».

Lo que debería haber hecho, ahora lo sabe, es preguntar a los alumnos: «¿Qué ha provocado que el olor del perfume haya llegado hasta el final de la clase?», y abrir un debate. Formular esta pregunta les habría empoderado para usar sus conocimientos y su imaginación y desarrollar ideas científicas sobre el concepto que se debatía. No se trata de «aprender algo», sino de «averiguarlo», subraya McLaren.

El desarrollo de los Estándares de Ciencias para la Próxima Generación ha sido un proyecto estatal de varios años, basado en parte en los estándares de diez países, entre ellos el Reino Unido, Finlandia y Japón. Al mismo tiempo, algunos de esos países toman a EE.UU. como modelo para mejorar su formación en CTIM. Según Merredith Portsmore, directora del Centro para la Enseñanza y la Divulgación de la Ingeniería de la Universidad Tufts, en Massachusetts, profesores de todo el mundo se han interesado por los métodos estadounidenses. «Están empezando a darse cuenta de los mismos problemas: a los estudiantes no les atraen las CTIM porque no son creativas».

Sin embargo, ciertas recomendaciones son difíciles de trasladar al aula. Algunos sistemas educativos exigen cumplir estándares muy estrictos o están organizados para clases con un gran número de alumnos, lo que complica que los profesores puedan proporcionar a los estudiantes la tutela personalizada y específica que necesitan.

Mejor por proyectos

Los Estándares de Ciencias para la Próxima Generación están subvencionados por grandes organizaciones estadounidenses como el Consejo Nacional de Investigación, la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias y la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia. Pero también hay entidades pequeñas que intentan cambiar el modo de enseñar ciencias.

La Fundación Nacional de Becas Woodrow Wilson, en Princeton (New Jersey), fue creada en 1945 para subsanar la escasez de profesores universitarios tras la Segunda Guerra Mundial. Colabora con universidades estadounidenses desde 2008 para renovar la formación de los docentes. Deborah Sachs, directora del programa Teach (STEM)[3] de la Universidad de Indianápolis, explica que en una de esas colaboraciones la fundación trabajó con esta universidad para responder la pregunta básica: «¿Qué necesita saber un profesor de CTIM para tener éxito?».

Una de las conclusiones fue que intentar explicar conceptos para que después los alumnos los apliquen —o, peor, que los repitan mecánicamente— no funciona. En lugar de ello, los profesores deben diseñar proyectos en los que los conceptos surjan mientras los estudiantes trabajan en problemas reales.

Sachs cita el ejemplo de un profesor de geometría que, dando una clase sobre el perímetro y el diámetro del círculo, hizo que los estudiantes elaboraran un mapa de las torres de telefonía y la intensidad de sus señales. Mientras realizaban la actividad, descubrieron por ellos mismos dónde existían vacíos en la cobertura de teléfonos móviles y adquirieron un conocimiento profundo de los conceptos matemáticos.

Desde sus comienzos en Indiana, esa fundación ha extendido su programa de formación a otros cinco estados, incluyendo 31 universidades. Ahora está empezando su propia academia de formación del profesorado, utilizando una de las expresiones de moda favoritas de la industria tecnológica: el «pensamiento de diseño» (*design thinking*). El término surgió en la década de 1960 con la idea de que el diseño debía ser racional y solucionar problemas, en vez de centrarse solo en la estética. Ello implica resolver problemas a través de la investigación, la empatía, la ideación y la fabricación de prototipos.

El pensamiento de diseño se utilizó en la década de 1980 para crear el primer ratón de ordenador de Apple. En este caso, el objetivo no era obtener un dispositivo señalador elegante, sino lograr que personas sin conocimientos técnicos pudieran manejar un ordenador fácilmente. Desde entonces, el pensamiento de diseño se ha utilizado para crear cepillos de dientes de mango grueso para niños (para una mano pequeña es más fácil sujetar un mango grande que uno pequeño) y para el lanzamiento de empresas disruptivas como Airbnb.

Conectar con los alumnos

Ubicada en una pequeña oficina a 15 minutos a pie del Instituto Tecnológico de Massachusetts en Cambridge, en la Academia Woodrow Wilson trabaja un grupo de empleados y estudiantes. Tratan de identificar algunos de los problemas de la actual formación del profesorado de CTIM y encontrar el modo de solucionarlos. Uno de sus retos es proporcionar a los docentes una mayor experiencia en la gestión de la clase, el trabajo con los colegas e incluso en las relaciones con los padres.

Se les ocurrieron varias ideas. Una de ellas es enviar a los futuros maestros al club de actividades extraescolares del Museo de Ciencias de Boston para que trabajen con niños en diferentes talleres, entre ellos el de impresión en 3D, el de edición de vídeos y el de creación de páginas web. Los niños no están allí por obligación, de

modo que los profesores deben conectar con ellos y mantener su interés si no quieren que se marchen.

Doyung Lee colaboró en el diseño del plan de estudios de la Academia en 2017. Explica que trabajar de voluntario en el museo le enseñó a crear un ambiente seguro y acogedor y que, en parte, lo logró interesándose por la vida privada de sus alumnos. Como explica Dan Coleman, director de diseño y formación de la Academia, «Puedes conocer muy bien los contenidos y ser un gran pedagogo, pero, si no sabes conectar con los estudiantes, fracasarás».

Lee también aprendió que la escuela puede mitigar el entusiasmo de un alumno, en vez de estimularlo. Rememora a un estudiante que cuando llegó al museo se ilusionó con la edición de vídeo y la animación. Estaba deseoso de mejorar sus destrezas y de compartir lo que estaba aprendiendo; sin embargo, el instituto era un suplicio para él.

Ese tipo de situaciones son las que pretenden solucionar los Estándares de Ciencias para la Próxima Generación, afirma McLaren. Cuando los chicos tienen la oportunidad de recibir una formación no reglada como la del museo de ciencias, consiguen satisfacer sus intereses y se entusiasman. Pero no es lo que suele ocurrir en la escuela. «En clase decimos "eso está muy bien, pero hoy vamos a hacer otra cosa"», apunta McLaren, y eso hunde su entusiasmo. Sería mejor, añade, adaptar la clase a los intereses de los estudiantes y después ir guiándolos dentro de los límites del temario.

Imaginemos a un alumno de ciencias ambientales interesado por la producción audiovisual. Si le pedimos que haga un vídeo sobre un fenómeno relacionado con el medioambiente como el ciclo del agua, su entusiasmo por realizar la filmación se trasladará a la investigación científica. «Cuando les das este tipo de libertad», dice McLaren, «es cuando se produce la magia.»

La práctica hace la perfección

Otra idea que ha intentado desarrollar la Academia Woodrow Wilson es que sus estudiantes (futuros maestros) practiquen situaciones del mundo real mediante simulaciones de ordenador.

Por ejemplo, los profesores suelen tener que lidiar con padres enfadados, pero rara vez ensayan estos encuentros antes de que ocurran en la vida real. El simulador permite probar diferentes estrategias y descubrir las que funcionan y las que no. «Terminan el encuentro sudados. Es como vivir una experiencia real», comenta Coleman.

Para los aspirantes a profesores, adquirir esa práctica resulta crucial, porque la falta de experiencia en el aula está relacionada inversamente con la eficiencia docente, y directamente con la deserción. Muchos docentes acaban dejando la profesión por no haber realizado prácticas cuando eran estudiantes. Aunque esto ocurre en todas las disciplinas, «es aún más desastroso en los profesores de ciencias porque son los que no suelen recibir ninguna formación de este tipo», explica Richard Ingersoll, sociólogo de la Escuela Superior de Educación de la Universidad de Pensilvania. «Algo así como una quinta parte de los nuevos profesores contratados nunca ha hecho prácticas. Su primer día de enseñanza es su primer día con niños. Sobre todo los profesores de ciencias».

Como las CTIM suelen basarse en la tecnología y los experimentos, es importante practicar en el aula. Uno de los profesores de la academia, Andrew Wild, lo sabe de primera mano. Se doctoró en didáctica de las ciencias por la Universidad Stanford en California antes de trabajar como profesor de ciencias en el área de la bahía de San Francisco. Un día llegó a su clase de 42 alumnos dispuesto a impartir una lección sobre circuitos. Pero no salió como esperaba. «Recuerdo los cables por en medio de la clase y los alumnos tropezándose con ellos y desenchufándolos del tablero de circuitos» relata. No había las suficientes tomas eléctricas y la clase fue un desastre. Aunque Wild conocía muy bien el tema, no haber previsto la falta de espacio y no estar preparado para resolver los problemas técnicos deslució la clase.

Profesores modélicos

Otro punto importante en la formación del profesorado, explica McLaren, es enseñarles con los métodos que quieres que utilicen en el aula. Lo que Deborah Hirsch, vicepresidenta de la Academia para iniciativas estratégicas, denomina «modelizar el modelo». «Para enseñar de forma diferente tenemos que aprender de forma diferente», apunta.

McLaren coincide y describe el ejemplo de un curso de capacitación profesional. «Hay que poner a los profesores en el lugar de los estudiantes», afirma. Para transmitir el concepto de causalidad, uno de los Estándares de Ciencias para la Próxima Generación, se colocaba a los profesores en situaciones que podían ocurrir en el aula y se les pedía que identificaran causas y patrones. Así llevaban a cabo su propia investigación para llegar a una explicación. La revelación aparece cuando «los docentes pueden ver la diferencia abismal que supone cambiar de método de enseñanza», apunta.

Osborne también anima a cambiar el modo en que los profesores de CTIM trabajan con los alumnos. Defiende la argumentación como método para que el estudiante entienda los conceptos científicos. «La historia de la ciencia es la historia de la invención y la argumentación», explica, mencionando los prolongados debates que tuvieron lugar sobre el funcionamiento del sistema solar o la causa de las enfermedades.

McLaren explica que a los profesores les lleva tiempo aprender esas técnicas y que él mismo no fue una excepción. En 2001 ganó el premio Milken, que se concede anualmente a los profesores ejemplares en cada estado de EE.UU., al principio o a mitad de su carrera. Sin embargo, volviendo la vista atrás, afirma: «Quiero escribir una carta pidiendo disculpas».

¿Qué escribiría? «No te di las suficientes oportunidades para que eligieras tu propio camino en la investigación… debería haberte dejado más libertad y haberte entendido mejor».

Joshua Hatch *es editor adjunto de* The Chronicle of Higher Education.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 562, págs. S2-S4, octubre de 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Federal science, technology, engineering, and mathematics (STEM) Education: 5-Year strategic plan. National Science and Technology Council, 2013.

The condition of college & career readiness 2016, ACT, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las buenas preguntas. Dennis M. Bartels en *IyC*, septiembre de 2013.

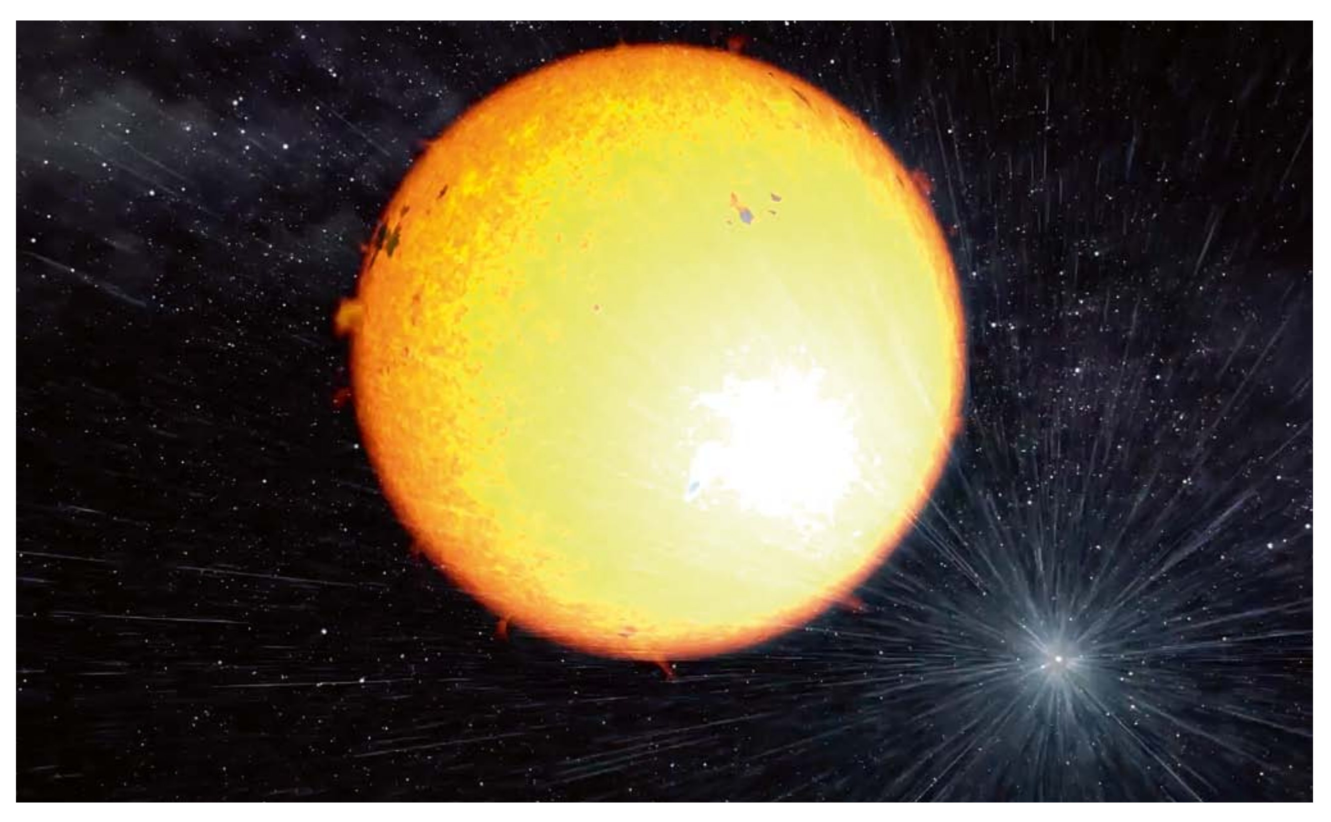
La educación científica del siglo XXI: Retos y propuestas. Neus Sanmartí Puig e Iván Marchán Carvajal en *IyC*, octubre de 2015.

ASTROFÍSICA

Un púlsar de 2,3 masas solares

Una nueva técnica permite encontrar una de las estrellas de neutrones más masivas que se conocen. El hallazgo reviste gran importancia para entender la composición interna de estos astros

MANUEL LINARES, TARIQ SHAHBAZ Y JORGE CASARES



¿LA ESTRELLA DE NEUTRONES MÁS DENSA CONOCIDA? El púlsar binario PSR J2215+5135 (*recreación artística*), situado a 10.000 años luz de la Tierra, se encuentra formado por una estrella de neutrones (*abajo a la derecha*) y un astro similar al Sol (*centro*). Un método pionero ha conseguido determinar que la masa de la estrella de neutrones asciende a 2,3 masas solares, un valor muy elevado que constriñe algunos de los modelos propuestos para describir el interior de estos astros.

G. PÉREZ DÍAZ, INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Medio siglo después de su descubrimiento por parte de Jocelyn Bell y Antony Hewish, hoy conocemos más de 2600 púlsares en la Vía Láctea. Cada una de estas fuentes de radio pulsantes indica la presencia de una estrella de neutrones, los objetos más densos del universo a excepción de los agujeros negros. Remanentes de estrellas muertas, estos astros giran sobre su eje como una peonza con frecuencias que pueden alcanzar los cientos de revoluciones por segundo. Al mismo tiempo, emiten un haz de radiación que, debido a su movimiento de rotación, se ve desde la Tierra en forma de destellos o pulsos intermitentes. A pesar de haber sido objeto de escrutinio durante medio siglo con telescopios cada vez más potentes, estos objetos siguen escondiendo numerosos misterios.

Uno de los principales guarda relación con la física nuclear y con las propiedades de la materia en condiciones extremas. Aunque el diámetro de una estrella de neutrones es de apenas 20 kilómetros (una cifra diminuta para los estándares astronómicos), su masa asciende a entre una y dos masas solares. El centro del astro contiene materia más densa que la que forma un núcleo atómico, y todo ello a temperaturas relativamente bajas. Las interacciones entre nucleones (protones y neutrones) a densidades tan extraordinarias son todavía inciertas. Esa incertidumbre no se debe a la falta de modelos teóricos, sino a la imposibilidad de ponerlos a prueba en la Tierra: hoy por hoy, no hay experimento en nuestro planeta que pueda producir materia en tales condiciones de densidad y temperatura. Ello convierte a las estrellas de neutrones en el único laboratorio al que tenemos acceso para estudiar las propiedades de la materia fría y ultradensa, un laboratorio donde se encuentran la astrofísica y la física nuclear.

En un trabajo publicado hace unos meses en *The Astrophysical Journal*, los tres firmantes de este artículo presentamos el hallazgo de una de las estrellas de neutrones más masivas conocidas hasta ahora. Gracias a un nuevo método, hemos determinado que la estrella de neutrones asociada al púlsar PSR J2215+5135 pre-

senta una masa 2,3 veces mayor que la del Sol. La existencia de un objeto tan masivo tiene hondas implicaciones para las teorías que describen el interior de estos astros, ya que impone limitaciones sobre algunos de los estados exóticos de la materia que se han propuesto para explicarlos.

Un púlsar con pareja de baile

Una de cada diez estrellas de neutrones vive en pareja, formando un sistema binario con otra estrella en el que ambas orbitan en torno al centro de masas común. Así ocurre con PSR J2215+5135, situado a unos 10.000 años luz de la Tierra y compuesto por una estrella de neutrones y una compañera similar al Sol. El período orbital del sistema asciende a unas cuatro horas; al mismo tiempo, la estrella de neutrones rota sobre sí misma con una frecuencia de unas 380 revoluciones por segundo.

En principio, el hecho de que una estrella pertenezca a un sistema binario resulta de gran utilidad, ya que entonces los parámetros orbitales del sistema permiten calcular la masa de sus componentes. Sin embargo, en casos como el de PSR J2215+5135 existe una dificultad añadida: la estrella de neutrones emite un intenso viento de partículas relativistas, las cuales impactan contra una de las caras de la estrella compañera y causan que su temperatura sea mucho mayor que la del lado opuesto, protegido del viento del púlsar y sumido en una especie de noche perpetua. En el caso de PSR J2215+5135, la cara iluminada de la estrella compañera alcanza una temperatura de unos 8100 kelvin, mientras que el lado opuesto se mantiene a unos 5700.

En tales condiciones no resulta sencillo medir con precisión la velocidad a la que orbitan los astros. Ello se debe a que la cara caliente emite más luz, lo que sesga las observaciones, ya que el hemisferio iluminado no se mueve exactamente a la misma velocidad que el centro de la estrella. Sin embargo, es este último parámetro orbital el que necesitamos para calcular con precisión las masas de los objetos.

Observar el lado oscuro

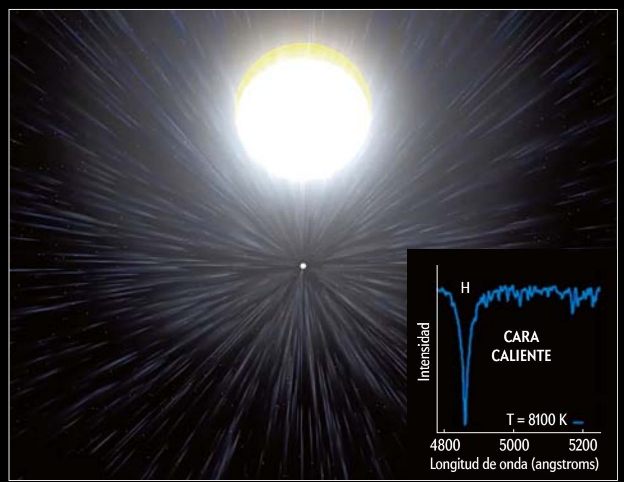
Para estudiar el sistema en detalle, observamos el púlsar PSR J2215+5135 con el Gran Telescopio Canarias y con otros dos telescopios situados en las islas de Tenerife y La Palma. Gracias a estos instrumentos, pudimos poner en práctica una nueva técnica que nos permitió determinar la masa del púlsar.

Dado que la cara iluminada y la cara oscura de la estrella compañera se encuentran a temperaturas tan diferentes, resulta posible deducir la velocidad a la que se mueve cada una estudiando las líneas espectrales asociadas a los distintos elementos químicos que se hallan en su atmósfera. En concreto, las líneas de absorción asociadas al hidrógeno nos permitieron trazar el movimiento de la cara caliente, mientras que las asociadas al magnesio nos proporcionaron, por primera vez, información sobre el lado más frío del objeto.

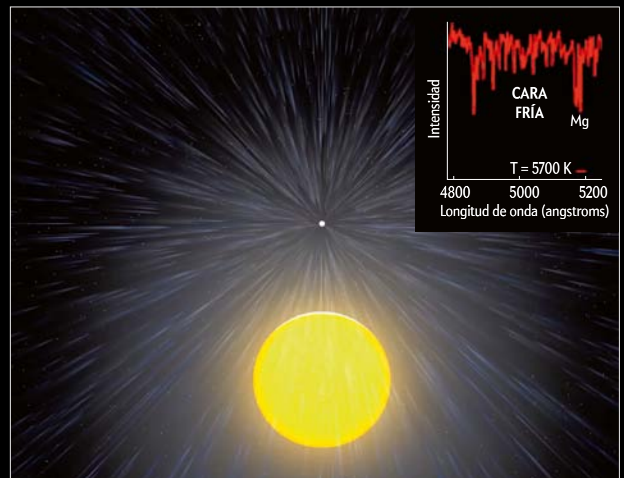
Al combinar estas velocidades con los cambios en el brillo de la estrella compañera a lo largo de la órbita, pudimos establecer finalmente la masa del púlsar. Como resultado, encontramos una de las estrellas de neutrones más masivas y densas que se conocen, con una masa igual a unas 2,3 veces la de Sol.

EL LADO OSCURO DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES

EN GENERAL, LOS PARÁMETROS ORBITALES de un sistema estelar binario permiten determinar la masa de las estrellas que lo componen. Sin embargo, en el caso de PSR J2215+5135, uno de los hemisferios del astro que acompaña a la estrella de neutrones se encuentra fuertemente iluminado por la radiación procedente de esta. Ello causa que la temperatura en ese lado sea muy superior a la del opuesto, lo que sesga las mediciones de la órbita ya que el «centro de luminosidad» del sistema no coincide con su centro de masas. Sin embargo, las líneas espectrales de los distintos elementos químicos presentes en la atmósfera del astro han permitido trazar el movimiento de cada uno de sus hemisferios estelares.



La cara iluminada de la estrella compañera (*arriba*) presenta una temperatura de 8100 kelvin. Como consecuencia, la absorción del hidrógeno (H) domina el espectro visible de ese lado del astro.



A medida que la compañera orbita en torno a la estrella de neutrones, expone hacia la Tierra su lado frío (*abajo*). Cuando eso ocurre, la absorción del magnesio (Mg) destaca en el espectro del objeto.

G. PÉREZ DÍAZ, INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Un nuevo laboratorio nuclear
Las implicaciones de un púlsar tan masivo para las teorías que describen el interior de estos astros son profundas. La interacción entre nucleones presenta una componente atractiva, la cual es la responsable de mantener unidos a los núcleos atómicos. Sin embargo, en el centro de una estrella de neutrones, es la componente repulsiva de la misma fuerza la que desempeña un papel fundamental: la atracción gravitatoria tiende a concentrar toda la materia en el centro del astro, de modo que es la presión central ejercida por los nucleones lo que evita que el objeto se derrumbe o «colapse» y dé lugar a un agujero negro.

Esa presión se mantiene gracias a la interacción entre nucleones. Aunque no sabemos exactamente cómo, estos se resisten a ser apretujados, como los pasajeros del metro de Tokio en hora punta. Por ello, la masa máxima de una estrella de neutrones puede indicarnos qué partículas forman la materia a tales densidades y cómo interaccionan entre sí.

Aunque la prudencia científica invita a confirmar este resultado con estudios independientes, nuestros resultados sugieren que la masa máxima que puede alcanzar una estrella de neutrones es de al menos 2,3 masas solares. De ser así, la presencia de quarks libres en el interior de estos objetos resulta poco probable, ya que esos y otros estados exóticos de la materia no parecen poder suministrar la presión necesaria para soportar un peso tan descomunal.

Manuel Linares *es investigador Marie Curie y profesor titular en la Universidad Politécnica de Cataluña.* ***Tariq Shahbaz*** *y* ***Jorge Casares*** *trabajan en el Instituto de Astrofísica de Canarias.*

PARA SABER MÁS

What holds the nucleus together? Hans A. Bethe en *Scientific American*, vol. 189, págs. 58-63, septiembre de 1953.
Masses, radii, and the equation of state of neutron stars. Ferial Özel y Paulo Freire en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 54, págs. 401-440, septiembre de 2016.
Peering into the dark side: Magnesium lines establish a massive neutron star in PSR J2215+5135. Manuel Linares, Tariq Shahbaz y Jorge Casares en *The Astrophysical Journal*, vol. 859, art. 54, mayo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Existen las estrellas de quarks? Markus Thoma en *IyC*, octubre de 2007.
Recreando materia estelar en el laboratorio. Laura Tolos en *IyC*, julio de 2013.





La mayor red de blogs de investigadores científicos


Dos ranas viejas
Cruzando límites entre la psicología y la criminología
Nereida Bueno Guerra
Universidad Pontificia Comillas


La bitácora del Beagle
Avances en neurobiología
Julio Rodríguez
Universidad de Santiago de Compostela


Neurociencia computacional
Inteligencia artificial para la psicología y la neurociencia
Carlos Pelta
Universidad Complutense de Madrid

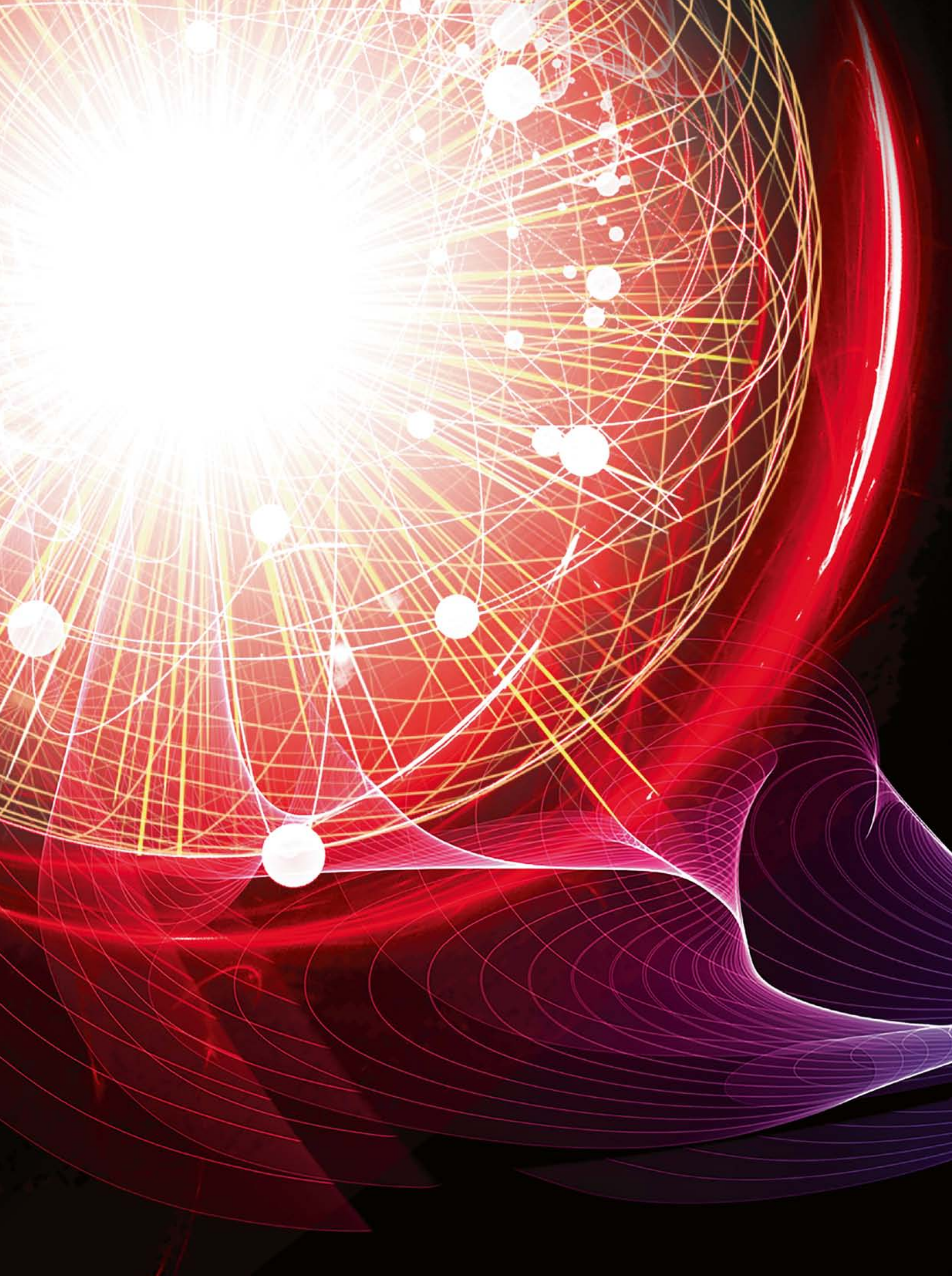

Cuantos completos
Tecnologías cuánticas y mucho más
Carlos Sabín
Instituto de Física Fundamental del CSIC


Perspectiva de Física y Universidad
Política científica, gran ciencia y mundo académico
Ramón Pascual de Sans
Universidad Autónoma de Barcelona


El rincón de Pasteur
El mundo invisible de los microorganismos
Ignacio López Goñi
Universidad de Navarra

Y muchos más...

¿Eres investigador y te gustaría unirte a SciLogs?
Envía tu propuesta a **redaccion@investigacionyciencia.es**



FÍSICA CUÁNTICA

ACCIÓN FANTASMAL

Tras cincuenta años de dudas, varios experimentos han acabado para siempre con la posibilidad de dar una explicación clásica al entrelazamiento cuántico

Ronald Hanson y Krister Shalm

Ilustración de Kenn Brown y Chris Wren, Mondolithic Studios

Ronald Hanson es físico de la Universidad Tecnológica de Delft y director científico de QuTech, una colaboración de la Organización para la Investigación Aplicada (TNO) de los Países Bajos centrada en la computación y las comunicaciones cuánticas.



Krister Shalm es físico del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de EE.UU. y de la Universidad de Colorado en Boulder, donde investiga los aspectos fundacionales de la mecánica cuántica.

No todas las revoluciones comienzan a lo grande. En mecánica cuántica, un cambio silencioso comenzó a gestarse en 1964, cuando el físico John Bell publicó un teorema que concluía en forma de desigualdad matemática. Aquella expresión invitaba a llevar a cabo un experimento para abordar algunas cuestiones filosóficas que habían preocupado a muchos de los fundadores de la teoría.

La pregunta era si dos partículas muy alejadas podrían mantener o no cierto tipo de conexión que permitía que las mediciones efectuadas sobre una afectasen a la otra. Según la física clásica, eso nunca debería ser posible. En mecánica cuántica, en cambio, parecía ocurrir todo el tiempo. El trabajo de Bell proponía un método para determinar de una vez por todas si el mundo era realmente tan extraño.

Durante el último medio siglo, la sencilla expresión matemática de Bell ha cambiado nuestra forma de pensar en la teoría cuántica. Hoy, muchas de las tecnologías cuánticas deben su origen al test propuesto por Bell. Sin embargo, las predicciones de su teorema no pudieron verificarse por completo hasta 2015, más de cincuenta años después de su formulación. Los últimos experimentos han puesto punto final a una búsqueda que se ha prolongado durante generaciones y que marcan el inicio de una nueva era en el desarrollo de tecnologías cuánticas.

VARIABLES OCULTAS

Para entender la fórmula de Bell debemos acudir a los fundamentos de la mecánica cuántica. Esta describe el comportamiento de la luz y la materia a las escalas más diminutas. Los átomos, los fotones y otras partículas no se comportan como los objetos de nuestra vida cotidiana. Una de las diferencias principales es que las partículas cuánticas existen en estados indeterminados. Consideremos el espín del electrón. Si un electrón cuyo espín es horizontal pasa a través de un campo magnético orientado verticalmente, la mitad de las veces se orientará hacia arriba y la otra mitad hacia abajo. La clave reside en que este resultado es verdaderamente aleatorio. Para verlo, podemos compararlo con el lanzamiento de una moneda: aunque cabría pensar que obtener cara o cruz es también aleatorio, si conocemos con precisión la masa de la moneda, la fuerza de lanzamiento y los detalles de las corrientes de aire que inciden sobre ella, seremos capaces de predecir con exactitud cómo aterrizará. Pero el espín del electrón es distinto. Incluso si sabemos todas las propiedades de la partícula antes de que atraviese el campo magnético, la indeterminación cuántica nos impedirá predecir cómo se desviará (aunque sí podremos calcular la probabilidad de que lo haga hacia arriba o hacia abajo). Sin embargo, cuando medimos un sistema cuántico, de algún modo todas esas posibilidades dejan de existir y se materializan un solo resultado: el electrón acaba con un espín bien definido, hacia arriba o hacia abajo.

Cuando, a principios del siglo xx, se formuló la teoría cuántica, algunos de sus fundadores, como Albert Einstein y Erwin Schrödinger, se sintieron incómodos con esa indeterminación. Quizá, pensaron, la naturaleza no sea tan imprecisa, y una futura teoría podrá predecir con exactitud el comportamiento de las partículas. Entonces seríamos capaces de vaticinar el resultado de una medida del espín del electrón de la misma manera en que podemos saber cómo aterrizará una moneda si disponemos de toda la información.

Para describir la imprecisión cuántica que se extiende sobre dos o más partículas, Schrödinger introdujo el concepto de entrelazamiento (*Verschränkung*, en alemán). Según la teoría cuántica, las propiedades de las partículas pueden estar entrelazadas de tal modo que su valor conjunto se conozca con precisión, pero los valores individuales permanezcan completamente indeterminados. Podemos establecer una analogía con dos dados que, aunque arrojan resultados aleatorios por separado, al final siempre suman siete. Schrödinger usó esta idea en un famoso experimento mental en el que la imprecisión en el estado de un átomo se vinculaba con que un gato estuviera vivo o muerto. No hay duda de que cualquier gato está vivo o muerto, y no en un absurdo limbo intermedio, razonó Schrödinger. Por tanto, deberíamos cuestionar la idea de que los átomos puedan ser imprecisos.

Poco antes, Einstein y sus colaboradores Boris Podolsky y Nathan Rosen, conocidos conjuntamente como EPR, habían analizado el caso de dos partículas entrelazadas y muy alejadas una de otra. Imaginemos que se trata de dos electrones cuyos espines se hallan entrelazados de tal manera que, al medirlos a lo largo de un mismo eje, siempre arrojan valores opuestos: si medimos el espín de uno y encontramos que apunta hacia arriba, el del otro lo hará necesariamente hacia abajo. Pero supongamos que las partículas están tan separadas que, aunque pudieran comunicarse a la velocidad de la luz, no les daría tiempo a hacerlo

EN SÍNTESIS

El entrelazamiento cuántico llevó a físicos como Einstein a concluir que la mecánica cuántica no podía ser una teoría completa. ¿Era posible deducirla a partir de una teoría subyacente con «variables ocultas»?

Aquella cuestión quedó relegada al ámbito filosófico hasta 1964. Aquel año, John Bell demostró que, en las condiciones experimentales adecuadas, las predicciones de la mecánica cuántica diferían de las de cualquier teoría de variables ocultas.

El test propuesto por Bell ha podido llevarse a cabo de manera concluyente hace poco. Los experimentos descartan una explicación de la naturaleza basada en variables ocultas locales y auguran una nueva generación de técnicas cuánticas.

antes de que midamos sus espines. En tal caso, ¿cómo «sabe» la segunda partícula que el espín de la primera apunta hacia arriba? Como es bien conocido, Einstein llamó a esta sincronización «acción fantasmal a distancia».

El análisis de EPR, publicado en 1935 en un artículo hoy clásico, partía de dos supuestos muy razonables. En primer lugar, si hay situaciones en las que es posible predecir con certeza el resultado de una medición, eso solo puede deberse a que hay una propiedad en la naturaleza que se corresponde con dicho resultado. Einstein llamó a tales propiedades «elementos de la realidad física». Si, por ejemplo, sabemos que el espín de un electrón apunta hacia arriba, podemos predecir con certeza que, al atravesar el campo magnético apropiado, siempre se desviará hacia arriba. En dicha situación, el espín del electrón constituiría un elemento de la realidad física, ya que se encuentra bien definido y no tiene ningún grado de imprecisión. El segundo supuesto de EPR era que ningún evento puede ejercer un efecto instantáneo sobre otro lejano: las influencias no pueden viajar más rápido que la luz.

Partiendo de estos supuestos, analicemos dos electrones entrelazados que dos personas, Alicia y Benito, mantienen en lugares distantes. Imaginemos que Alicia mide el espín de su electrón en la dirección z. Dado que existe una anticorrelación perfecta, Alicia sabe inmediatamente cuál será el resultado que obtendrá Benito si mide el espín de su electrón a lo largo del eje z. Así que, de acuerdo con EPR, esa componente del espín del electrón de Benito corresponderá a un elemento de la realidad física. De igual modo, si Alicia decide medir el espín de su electrón a lo largo del eje x, sabrá con certeza el resultado que se obtendría al medir el espín del electrón de Benito en la dirección x. En este caso, es la componente x del espín del electrón de Benito la que corresponde a un elemento de la realidad física. Pero, si Alicia y Benito están muy alejados, la decisión de Alicia de medir en la dirección z o en la dirección x no puede influir en la localización de Benito. Por tanto, para explicar las anticorrelaciones perfectas predichas por la teoría cuántica, el valor del espín del electrón de Benito debe ser perfectamente predecible tanto en la dirección z como en la x. Pero esto último parece contradecir la teoría cuántica, ya que el principio de incertidumbre de Heisenberg establece que el espín solo puede tener un valor bien definido en una dirección, pero debe ser impreciso en el resto.

Este conflicto llevó a EPR a concluir que la mecánica cuántica no era una teoría completa, y sugirieron que tal vez fuese posible resolver la contradicción enriqueciendo la teoría con variables adicionales. En otras palabras: quizás existiese una teoría más profunda en la que los electrones poseyesen propiedades adicionales que sí describirían cómo se comportan al medirlos conjuntamente. Esas variables adicionales permanecerían ocultas, pero, si tuviésemos acceso a ellas, podríamos predecir con exactitud qué les pasa a los electrones. Al igual que al lanzar una moneda, la aparente imprecisión de las partículas cuánticas solo se debería a nuestra ignorancia. Estas hipotéticas teorías sucesoras de la mecánica cuántica se conocen como «teorías de variables ocultas locales», donde «locales» hace referencia a que sus señales no pueden viajar más rápido que la luz.

LA APORTACIÓN DE BELL

Einstein no cuestionó las predicciones de la mecánica cuántica; antes bien, creía que existía una verdad más profunda en forma de variables ocultas. Sin embargo, tras la publicación del artículo de EPR, el interés por estas cuestiones disminuyó. La posibilidad de que hubiese variables ocultas se consideraba una cuestión filosófica sin ningún valor práctico: las predicciones de las teorías con y sin variables ocultas parecían ser idénticas.

Todo eso cambió en 1964, cuando Bell demostró que, en determinadas circunstancias, las teorías de variables ocultas y la mecánica cuántica predecían cosas muy distintas. Aquel hallazgo significaba que era posible poner a prueba experimentalmente la existencia de variables ocultas locales y, por tanto, esa verdad más profunda que anhelaba Einstein.

Bell analizó el experimento mental de EPR, pero introdujo una diferencia: dejó que Alicia y Benito midieran los espines de sus respectivos electrones en cualquier dirección. En el experimento tradicional, Alicia y Benito miden los espines a lo largo de un mismo eje y comprueban si sus resultados están anticorrelacionados al 100 por cien. Pero, si Alicia y Benito miden en direcciones diferentes, sus resultados no siempre estarán correlacionados. Es ahí donde surgen las diferencias entre la mecánica cuántica y las teorías de variables ocultas.

Bell demostró que, para ciertos conjuntos de direcciones, la teoría cuántica predecía correlaciones más fuertes que cualquier posible teoría de variables ocultas locales: una diferencia conocida como desigualdad de Bell. Estas discrepancias aparecen porque las variables ocultas no pueden comunicarse a mayor velocidad que la de la luz y, por consiguiente, la manera en que pueden coordinarse se ve limitada. La mecánica cuántica, en cambio, permite que los espines de ambos electrones existan en un único estado entrelazado que puede extenderse a lo largo de enormes distancias. En concreto, el entrelazamiento hace que la teoría cuántica prediga correlaciones hasta un 40 por ciento más fuertes.

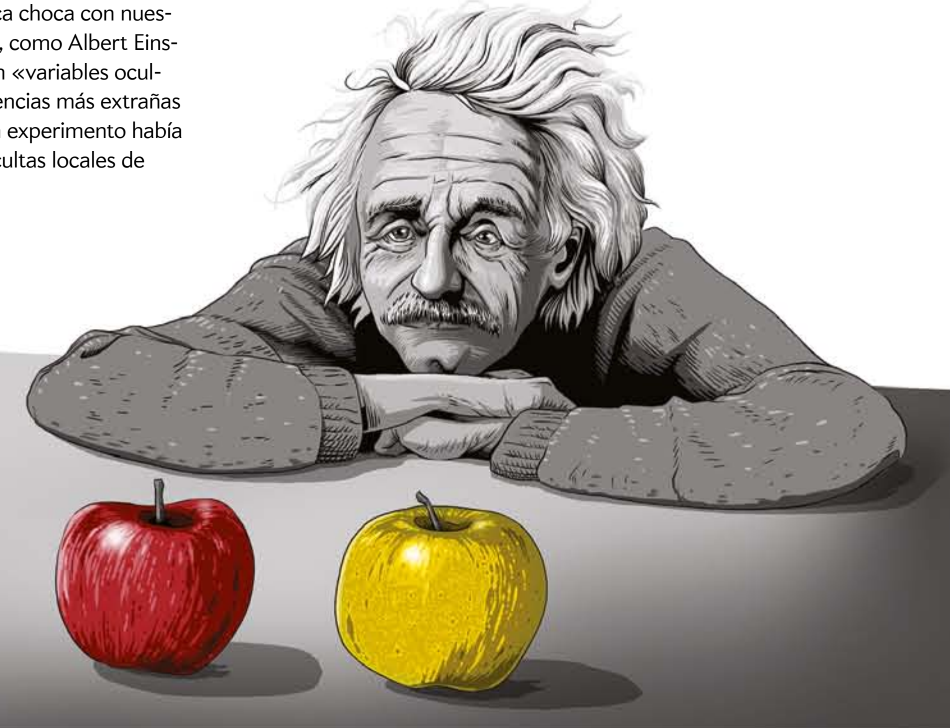
El teorema de Bell transformó por completo la manera de pensar de los físicos. Puso de manifiesto un conflicto entre la visión de Einstein y la teoría cuántica, y esbozó una manera eficaz de someter ambas visiones del mundo al juicio del experimento. Dado que el teorema de Bell implica una desigualdad matemática que limita la fuerza de las correlaciones en cualquier teoría de variables ocultas locales, si observamos que tales límites se superan —es decir, si la naturaleza «viola» la desigualdad de Bell—, podemos concluir que las teorías de variables ocultas no pueden describir la realidad.

Poco después del artículo de Bell, John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt encontraron otras desigualdades similares pero más fáciles de verificar en los experimentos. Las primeras pruebas se realizaron a finales de los años sesenta, y desde entonces se han ido acercando cada vez más a la configuración ideal propuesta por Bell. Se han encontrado correlaciones que violan la desigualdad de Bell y que aparentemente no pueden explicarse mediante teorías de variables ocultas locales. Sin embargo, debido a imperfecciones en los experimentos, hasta 2015 los resultados siempre dependían de una o más suposiciones adicionales. Ello proporcionaba resquicios, o «lagunas», que, en principio, dejaban la puerta abierta a la existencia de variables ocultas locales.

En casi todos los experimentos de este tipo efectuados en el siglo xx, se generaban fotones entrelazados y se enviaban a sendas estaciones de medida, que desempeñaban el papel de Alicia y Benito. En ellas se medía la polarización del fotón correspondiente (la dirección en la que oscila el campo eléctrico, la cual puede entenderse como el espín del fotón). Por último, se calculaban las correlaciones medias entre los resultados de ambas estaciones y se comprobaba si violaban o no la desigualdad de Bell.

Sortear todas las lagunas

El universo que propone la mecánica cuántica choca con nuestra intuición sobre la realidad. Algunos físicos, como Albert Einstein, esperaban que una teoría alternativa con «variables ocultas» pudiera explicar algunas de las consecuencias más extrañas de la física cuántica. Hasta hace poco, ningún experimento había podido descartar la existencia de variables ocultas locales de manera concluyente. Eso cambió en 2015.



Las objeciones de Einstein a la teoría cuántica se basaban en dos principios: el ***realismo*** y la ***localidad***.

El realismo postula que los objetos tienen propiedades bien definidas: una manzana, por ejemplo, es roja o amarilla.

La localidad es la idea de que un objeto solo puede verse afectado por su entorno inmediato; las señales no pueden viajar más rápido que la luz.



Según la mecánica cuántica, una partícula puede encontrarse en un estado indefinido.

Por ejemplo, una manzana cuántica…







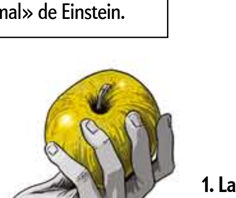
Dos partículas pueden estar entrelazadas. Eso significa que, si miramos una de las manzanas y vemos que es roja, la otra deberá ser amarilla.

El entrelazamiento se mantiene con independencia de la distancia entre las partículas.

Einstein se negó a aceptar este concepto, al que llamó «acción fantasmal a distancia».

Afirmó que el entrelazamiento debía estar controlado por variables ocultas locales, ignotas para los observadores. De lo contrario, las influencias físicas tendrían que viajar más rápido que la luz.

En 1964, John Bell descubrió que la mecánica cuántica entraba en conflicto con cualquier teoría de variables ocultas locales y halló un modo de comprobar si estas podían explicar la aparente «acción fantasmal» de Einstein.



Test de Bell: Dos observadores miden de manera independiente sendas partículas entrelazadas. Bell calculó la máxima correlación que podría surgir entre los resultados en caso de que en la naturaleza hubiese variables ocultas locales.



Los físicos se pusieron manos a la obra e implementaron el test. No obstante, dos deficiencias, o «lagunas», dejaban margen a las variables ocultas.



1. Laguna de la localidad
Las estaciones de medición están tan cerca que, durante el experimento, tienen tiempo de comunicarse entre ellas a una velocidad inferior a la de la luz.

2. Laguna de la detección
Los detectores no son capaces de medir todas las partículas entrelazadas.

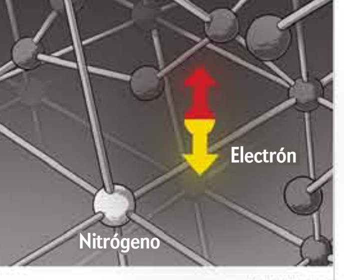
En 2015, varios grupos idearon versiones de la prueba de Bell que sorteaban ambas lagunas.

Uno, en la Universidad Tecnológica de Delft, comienza con dos pequeños diamantes.



La red de carbono casi perfecta de un diamante puede presentar defectos aislados en forma de átomos de nitrógeno.

En algunos lugares, junto a uno de esos átomos de nitrógeno falta uno de carbono: una «vacante» que actúa como una trampa de electrones.



Los electrones tienen su espín orientado hacia…



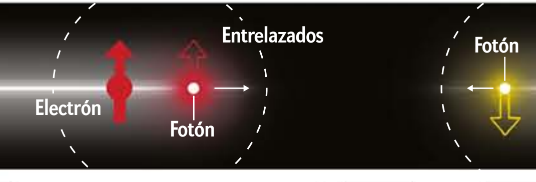
o en una superposición de ambos estados.

Con dos electrones alojados en sendos diamantes separados 1280 metros, es posible asegurarse de que las partículas no tienen tiempo de comunicarse, ni siquiera a la velocidad de la luz, durante el tiempo que se tarda en medir el espín del electrón.

Eso evade la laguna de la localidad

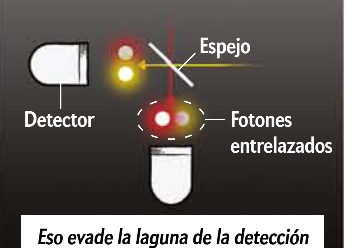


Un láser excita los electrones; estos emiten fotones entrelazados con el espín de los primeros.



Esos fotones atraviesan el campus hasta que se encuentran en un detector.

Cuando los fotones se encuentran, se entrelazan. Por extensión, sus respectivos electrones —más fáciles de detectar que los fotones— también pasan a estar entrelazados.



Eso evade la laguna de la detección

Primer test de Bell sin lagunas.




En Delft, los físicos efectuaron 245 tests con pares de electrones entrelazados y separados 1280 metros. Midieron las partículas y encontraron que el 80 por ciento de ellas estaban correlacionadas: mucho más de lo que permitirían las teorías de variables ocultas locales.

Otros experimentos en EE.UU., Austria y Alemania obtuvieron resultados similares.

Estos resultados demuestran de manera concluyente que las consecuencias del entrelazamiento no pueden explicarse mediante variables ocultas locales.

Definitivamente, el universo es extraño.



MATTHEW TWOMBLY (*ilustraciones*); ADAPTADO DE *TU DELFT–A LOOPHOLE-FREE BELL TEST*; TEXTOS DE MICHEL VAN BAAL Y GRÁFICOS DE SCIXEL; UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE DELFT, 2015

TESTS CON LIMITACIONES

Los primeros experimentos usaron direcciones de medición fijas. En tales casos, las variables ocultas tienen tiempo más que suficiente de influir en los resultados, ya que conocemos de antemano la dirección de medición usada en cualquiera de las estaciones. Es decir, Benito podría enterarse de qué dirección empleó Alicia para medir su fotón por medio de señales ocultas sublumínicas. Esta «laguna de la localidad» significa que una teoría de variables ocultas podría reproducir las correlaciones cuánticas observadas.

En 1982, Alain Aspect y su equipo llevaron a cabo un experimento en el que enviaron fotones a extremos opuestos de una gran habitación y midieron su polarización. Mientras las partículas volaban a su destino, el ángulo de polarización del aparato de medida cambiaba periódicamente. A finales de los años 90, Anton Zeilinger, ahora en la Universidad de Viena, y sus colaboradores perfeccionaron la estrategia al emplear direcciones de medida verdaderamente aleatorias (en vez de periódicas). Además, esas direcciones se determinaban poco antes de efectuar la medición, de modo que las señales ocultas habrían tenido que viajar más rápido que la luz para influir en los resultados. Aquellos experimentos sortearon la laguna de la localidad.

No obstante, dichos estudios presentaban un inconveniente. Trabajar con fotones es difícil: la mayoría de las veces no se obtiene ninguna respuesta, por la sencilla razón de que los fotones se pierden por el camino o ni siquiera se generan. Como consecuencia, los investigadores se veían obligados a asumir que los pocos intentos que funcionaban constituían una muestra representativa de todo el conjunto de ensayos. Esta deficiencia se conoce como «laguna de la detección» (*fair sampling*, o «muestreo justo»). Era posible que las veces en que desaparecían los fotones ocurriese algo diferente y que, al incluir esos datos, los resultados se tornaran compatibles con las predicciones de las teorías de variables ocultas locales. La laguna de la detección fue sorteada a principios de este siglo, al sustituir los fotones por partículas de materia (iones atrapados, átomos, circuitos superconductores y núcleos en átomos de diamante), las cuales pueden entrelazarse y detectarse con eficiencia. En tales casos, sin embargo, las partículas permanecían muy cerca unas de otras, por lo que no se evitaba la laguna de la localidad. Por tanto, todos esos tests de Bell podían, al menos en principio, explicarse mediante alguna teoría de variables ocultas locales. Efectuar una prueba de Bell sin ninguna laguna se convirtió en uno de los mayores retos de la ciencia cuántica.

Gracias a los rápidos avances en la capacidad de controlar y medir sistemas cuánticos, en 2015, 80 años después del artículo de EPR y 51 después del de Bell, fue posible llevar a cabo el experimento en la configuración ideal. En pocos meses, cuatro grupos diferentes encontramos resultados que violaban la desigualdad de Bell sin ninguna laguna. Ello proporcionó las primeras pruebas experimentales concluyentes contra las teorías de variables ocultas locales.

SORTEAR LOS OBSTÁCULOS

El equipo de uno de nosotros (Hanson) llevó a cabo el primer test de Bell sin lagunas en la Universidad Tecnológica de Delft. Nuestra configuración era muy cercana a la idea original de EPR: consistía en entrelazar los espines de dos electrones alojados en sendos diamantes. Estos se encontraban en laboratorios situados en extremos opuestos del campus. A fin de impedir la comunicación entre ellos, usamos un veloz generador de números aleatorios para determinar la dirección de medida. Una vez efectuada, el resultado se almacenaba en un disco duro antes de que la información de lo que ocurría en el otro laboratorio hubiera tenido tiempo de llegar. Aunque se desplazase a la velocidad de la luz, una señal oculta que informara a una de las estaciones sobre lo que ocurría en la otra nunca habría podido recorrer el trayecto a tiempo. Ello evitaba la laguna de la localidad.

Esas estrictas condiciones sobre los tiempos del experimento nos obligaron a separar los electrones más de un kilómetro: dos órdenes de magnitud por encima del récord mundial previo para sistemas de materia entrelazada. Logramos esa separación gracias a una técnica llamada intercambio de entrelazamiento (*entanglement swapping*). En ella, primero se entrelaza cada electrón con un fotón. Luego, hacemos que los fotones se encuentren a medio camino entre los dos laboratorios, donde hay un espejo semitransparente con detectores a ambos lados. Si detectamos los fotones a distintos lados del espejo, entonces los espines de los electrones entrelazados con cada fotón se entrelazan entre sí. Es decir, el entrelazamiento entre electrones y fotones se convierte en un entrelazamiento entre los electrones. Este proceso falla a menudo: los fotones pueden perderse entre los diamantes y el espejo. Sin embargo, solo comenzamos un test de Bell si se detectan ambos fotones. De esta manera sorteamos la laguna de la detección, ya que nuestros resultados finales no excluían información de ningún test de Bell.

La pérdida de fotones relacionada con la gran separación no limita la calidad del entrelazamiento, aunque sí impone serias restricciones sobre la velocidad a la que podemos efectuar los tests de Bell: tan solo unos pocos por hora. Tras llevar a cabo el experimento de manera ininterrumpida durante varias semanas de junio de 2015, hallamos una violación de la desigualdad de Bell de hasta el 20 por ciento, en perfecto acuerdo con las predicciones de la teoría cuántica. La probabilidad de obtener esos resultados con un modelo de variables ocultas locales, incluso permitiendo que los dispositivos hubieran conspirado con malicia usando todos los datos disponibles, era de 0,039. En una segunda tanda de experimentos realizada en diciembre de 2015, encontramos una violación similar de la desigualdad de Bell.

Ese mismo año, otros tres grupos lograron efectuar tests de Bell sin lagunas. En septiembre, físicos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de EE.UU. y otras instituciones, dirigidos por uno de nosotros (Shalm), emplearon fotones entrelazados. El mismo mes hizo lo propio el grupo de Zeilinger y, no mucho después, el equipo de Harald Weinfurter, de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich, usó átomos de rubidio separados 400 metros con un esquema similar al del grupo de Hanson. (Los experimentos de Delft, el NIST y Viena contaron con la participación de Carlos Abellán, Waldimar Amaya, Morgan Mitchell y Valerio Pruneri, del Instituto de Ciencias Fotónicas de Barcelona.)

Tanto el equipo del NIST como el de Viena entrelazaron la polarización de los fotones empleando láseres para excitar un material cristalino. Aproximadamente uno de cada mil millones de fotones láser que entraban al cristal se dividía en un par de fotones entrelazados. Con láseres de suficiente potencia, fue posible generar decenas de miles de pares de fotones entrelazados por segundo. Luego, cada fotón de un par se enviaba a estaciones distantes (separadas 184 metros en el experimento del NIST y 60 en el de Viena) donde se medía su polarización. Mientras los fotones volaban hacia ellas, un sistema decidía en qué dirección medir la polarización, lo que imposibilitaba que una variable oculta influyera en los resultados. Ello sorteó la laguna de la localidad. Lo más complicado de usar fotones

es evitar que se pierdan. Para evitar la laguna de la detección, este montaje experimental exige detectar más de dos tercios de los fotones generados. La mayoría de los detectores tienen una eficiencia cercana al 60 por ciento. Pero ciertos detectores desarrollados en el NIST con superconductores fríos son capaces de observar más del 90 por ciento de los fotones que llegan hasta ellos. Aquello sorteó la laguna de la detección.

Al repetir las medidas de polarización con múltiples pares de fotones entrelazados (a un ritmo de más de 100.000 veces por segundo), logramos acumular rápidamente estadística sobre las correlaciones. Las observadas en ambos experimentos eran mucho más fuertes que las predichas por las teorías de variables ocultas. De hecho, la probabilidad de que los resultados del NIST fueran producto del azar era del orden de uno entre mil millones (mucho más difícil que ganar el primer premio de los Euromillones), y fue aún menor en el experimento de Viena. Hoy, nuestro grupo del NIST emplea de manera habitual una versión mejorada del experimento para obtener una violación similar de las desigualdades de Bell en menos de un minuto, y futuras mejoras acelerarán el proceso en dos órdenes de magnitud.

APROVECHAR EL ENTRELAZAMIENTO

Estos experimentos nos obligan a concluir que las teorías de variables ocultas locales, como las que propuso Einstein en su día, resultan incompatibles con la naturaleza. Las correlaciones que hemos observado entre partículas desafían nuestra intuición y demuestran que la «acción fantasmal» realmente ocurre.

Nuestros resultados también indican que el entrelazamiento cuántico posee un enorme potencial técnico. Una aplicación a corto plazo donde pueden ser útiles los tests de Bell sin lagunas es la generación de números aleatorios, un proceso clave en varias técnicas criptográficas y de seguridad. Si fuésemos capaces de predecir qué número arrojará un generador de números aleatorios, podríamos piratear muchos sistemas financieros y de comunicaciones. Por tanto, resulta de vital importancia contar con un generador imposible de predecir. Para crear números aleatorios suelen emplearse algoritmos matemáticos o procesos físicos. Con los algoritmos, si conocemos las condiciones usadas a modo de «semilla», a menudo resulta posible predecir la salida. En cuanto a los procesos físicos, es necesaria una comprensión detallada de la física subyacente: si pasamos por alto un solo detalle, un pirata informático puede sacar partido de ello. La historia de la criptografía se halla repleta de casos en los que se ha vulnerado la seguridad de ambos tipos de sistemas.

Pero la mecánica cuántica nos ha hecho un regalo: es posible «extraer» la aleatoriedad inherente a los procesos cuánticos para producir números genuinamente aleatorios. A partir de las correlaciones medidas en una prueba de Bell sin lagunas, puede obtenerse una cadena de números cuya aleatoriedad está certificada. Incluso podríamos dejar en manos de un pirata informático una parte del dispositivo experimental (la fuente de partículas entrelazadas) y, aun así, producir números tan aleatorios como nos permite la naturaleza. A principios de 2018, nuestro equipo del NIST logró extraer 1024 bits verdaderamente aleatorios a partir de 10 minutos de datos experimentales obtenidos con nuestra configuración. Se certificó que estos bits eran aleatorios con una precisión de más de una parte por billón. En cambio, un generador tradicional necesitaría cientos de miles de años de adquisición de datos para lograr lo mismo. Ahora estamos trabajando para incorporar nuestro generador de números aleatorios a una fuente de aleatoriedad pública. Esta herramienta podría producir números aleatorios con marcas de tiempo y transmitirlos a través de Internet a intervalos fijos, para que cualquiera pueda usarlos en aplicaciones de seguridad.

En un plano más general, las técnicas desarrolladas en estos experimentos podrían dar lugar a un tipo completamente nuevo de redes de comunicación. Conocidas a menudo como «Internet cuántica», estas redes podrían lograr objetivos imposibles de conseguir con redes clásicas, desde comunicaciones seguras y redes de sensores cuánticos hasta el acceso seguro a ordenadores cuánticos en la nube. Otra meta es la llamada «criptografía independiente del dispositivo», en la que los usuarios pueden verificar que una clave compartida es secreta gracias a la violación de la desigualdad de Bell [*véase* «Los límites físicos de la privacidad», por A. Ekert y R. Renner; Investigación y Ciencia, enero de 2016].

La llamada «columna vertebral» de una futura Internet cuántica se articulará mediante conexiones de entrelazamiento, al igual que las configuraciones usadas para examinar las desigualdades de Bell con defectos en diamantes, átomos atrapados y fotones. En 2017, nuestro equipo en Delft puso en práctica un método para mejorar la calidad de los espines entrelazados remotos y, en 2018, aumentamos las tasas de entrelazamiento en tres órdenes de magnitud. A partir de estos avances, los investigadores se afanan por conseguir la primera versión rudimentaria de una Internet cuántica, la cual está previsto que se despliegue en 2020 en algunas ciudades de los Países Bajos.

Hace ocho décadas, en los albores de la mecánica cuántica, a muchos escépticos les irritaba la manera en que esta teoría chocaba con la intuición física desarrollada por los humanos a lo largo de los siglos. Ahora, cuatro experimentos han acabado para siempre con esa intuición. Nuestros resultados dan pie a explotar la naturaleza de una manera que ni Einstein ni Bell habrían podido anticipar. La revolución silenciosa que inició John Bell se encuentra hoy en pleno apogeo. IyC

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *La interpretación de la mecánica cuántica*, un monográfico digital (en PDF) que recopila varios artículos históricos de nuestra hemeroteca sobre los principales paradigmas interpretativos de la teoría cuántica.



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial

PARA SABER MÁS

Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 Kilometres. B. Hensen et al. en *Nature*, vol. 526, págs. 682-686, octubre de 2015.

Significant loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. M. Giustina et al. en *Physical Review Letters*, vol. 115, art. 250401, diciembre de 2015.

Strong loophole-free test of local realism. L. K. Shalm et al. en *Physical Review Letters*, vol. 115, art. 250402, diciembre de 2015.

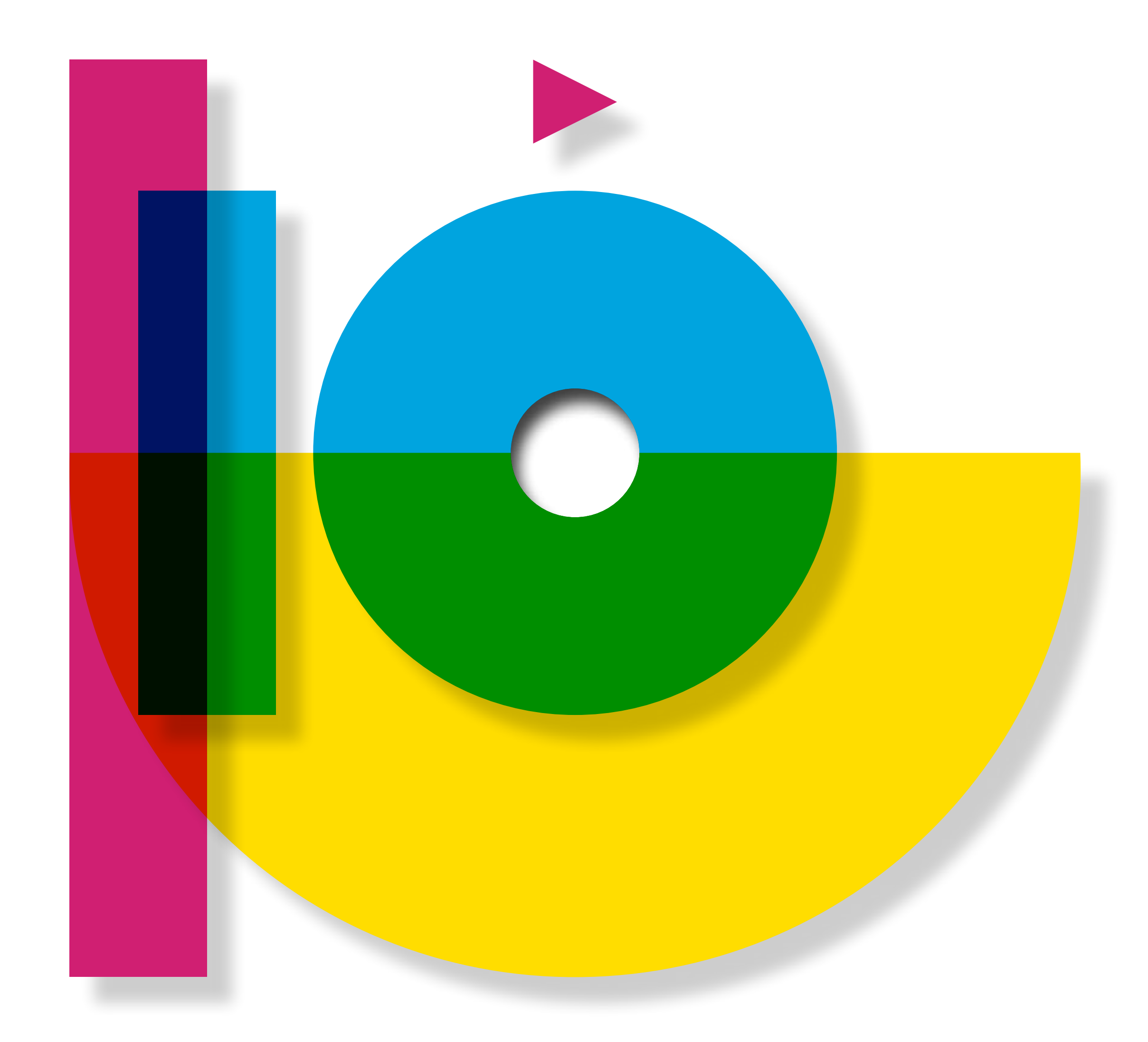
EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría cuántica y realidad. B. D'Espagnat en *IyC*, enero de 1980.

Realidad del mundo cuántico. A. Shimony en *IyC*, marzo de 1988.

Un test de Bell sin escapatorias. C. Abellán, W. Amaya y M. Mitchell en *IyC*, enero de 2016.





INFORME ESPECIAL

LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO

COMPRENDER LAS ÚLTIMAS INNOVACIONES Y LOS RETOS QUE PLANTEAN AYUDARÁ A LA SOCIEDAD A MAXIMIZAR SUS BENEFICIOS

Ilustraciones de Vanessa Branchi

EN SÍNTESIS

La inteligencia artificial está empleándose para descubrir nuevos materiales y medicamentos, así como para mejorar los asistentes digitales actuales. Pronto tendremos acceso a una realidad aumentada con imágenes y datos, y veremos cómo los ordenadores cuánticos superan a los clásicos gracias a nuevos algoritmos.

En salud, las pruebas de diagnóstico avanzado están expandiendo el alcance de la medicina de precisión. El implante de células capaces de producir fármacos y de escapar a la detección del sistema inmunitario podría, junto con las terapias de estimulación nerviosa, perfeccionar el tratamiento y el control de las enfermedades.

En lo que atañe a otros retos sociales, los últimos años han visto grandes avances en la obtención de carne de laboratorio; en el ámbito de la genética dirigida se están elaborando normas para regular el uso de ciertas herramientas con el potencial de alterar especies, y los nanomateriales controlados por luz podrían aumentar la eficiencia de los paneles solares.

Cabe imaginar que la tecnología cambiará nuestra vida en el futuro próximo, pero ¿cómo? La inteligencia artificial impulsará rápidos avances en el diseño de fármacos y materiales. Las técnicas de diagnóstico avanzado posibilitarán una medicina cada vez más personalizada. La realidad aumentada asomará por doquier, superponiendo información y animaciones a imágenes del mundo real para ayudarnos con las tareas cotidianas y para mejorar los procesos industriales. Si usted enferma, se le implantarán células vivas que actuarán como fábricas de medicamentos y tratarán su dolencia. Además, podrá comer carne de ternera, pollo y pescado cultivada en laboratorio a partir de células madre, lo que reducirá en gran medida el impacto ambiental asociado a la actividad ganadera y salvará a numerosos animales de prácticas crueles.

Estas ideas y el resto de las que integran la lista que presentamos aquí han sido elegidas por destacados expertos en biología, química inorgánica, robótica e inteligencia artificial. La lista es fruto de un cuidadoso proceso de selección.

En un primer momento solicitamos recomendaciones a la Red de Expertos y a los Consejos para un Futuro Global (dos organismos del Foro Económico Mundial), así como a los miembros del comité asesor de *Scientific American*. Tras varias reuniones virtuales, el comité de expertos de esta iniciativa evaluó si las candidatas satisfacían diversos criterios. Una técnica debía contar con la capacidad de brindar beneficios sociales y económicos en un plazo de entre tres y cinco años. También debía ser capaz de revolucionar la industria o las formas establecidas de hacer las cosas. Por último, debía encontrarse en etapas relativamente tempranas de desarrollo; es decir, tenía que ser objeto de estudio por parte de varios grupos, generar entusiasmo entre los expertos, atraer inversiones crecientes y, en el caso ideal, implicar a más de una empresa. Tras una primera criba, nuestro comité acortó la lista inicial, compuesta por más de 50 propuestas, y luego recabó información adicional para valorar las 20 que habían sobrevivido. La decisión final se tomó después de otras dos reuniones.

—Mariette DiChristina y Bernard S. Meyerson



COMPUTACIÓN

REALIDAD AUMENTADA

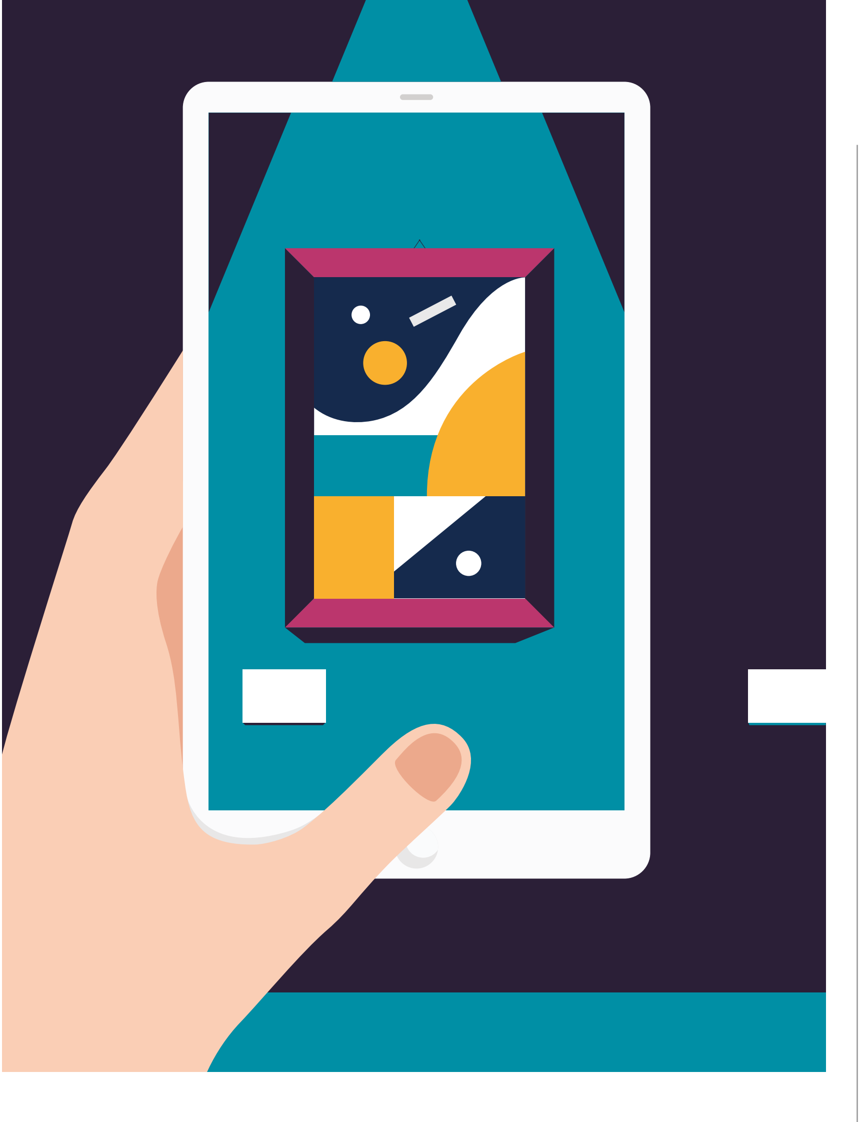
UN MUNDO COMPLEMENTADO POR DATOS E IMÁGENES EN TIEMPO REAL

Por Corinna E. Lathan y Andrew Maynard

La realidad virtual nos sumerge en un universo ficticio y aislado. La realidad aumentada, en cambio, superpone sobre el mundo real información generada en tiempo real por un ordenador. Así, al usar un dispositivo equipado con realidad aumentada y una cámara (un teléfono móvil, una tableta, un casco o unas gafas inteligentes), el programa analiza las secuencias entrantes de vídeo, descarga información relacionada con la escena y superpone sobre ella datos relevantes, imágenes o animaciones, a menudo tridimensionales.

He aquí dos ejemplos: el sistema de visualización que ayuda a un vehículo a ir marcha atrás sin peligro y el popular juego Pokémon GO. Existen, además, multitud de aplicaciones móviles que incorporan realidad aumentada, como las que traducen las señales de tráfico en el extranjero, las que permiten a los estudiantes diseccionar ranas virtuales y las que sirven para que los clientes puedan comprobar cómo quedará una butaca en el salón antes de llevársela a casa. En el futuro, esta tecnología permitirá a los visitantes de un museo disfrutar de guías similares a hologramas; a los cirujanos observar en tres dimensiones los tejidos subcutáneos de un paciente; a arquitectos y diseñadores colaborar de formas novedosas; a los controladores de drones trabajar con imágenes mejoradas, y a aprendices de todo tipo adquirir con rapidez los rudimentos necesarios para desempeñar nuevas tareas en áreas que irán desde la medicina hasta el mantenimiento de una fábrica.

En los próximos años, cabe esperar que la oferta aumente debido al auge de las herramientas informáticas que facilitan el diseño de aplicaciones. Sin embargo, donde por ahora mayor impacto está teniendo la realidad aumentada es en la industria, donde se ha convertido en un elemento esencial de la denominada «Cuarta Revolución Industrial» o «Industria 4.0»: la transformación de los procesos de manufactura mediante la integración de sistemas físicos y digitales con el objetivo de mejorar la calidad, disminuir los costes y aumentar la eficiencia. Muchas empresas ya están probando su utilidad en líneas de montaje. La realidad aumentada puede aportar la información correcta en el



preciso instante en que se necesita (por ejemplo, cuándo tiene un trabajador que seleccionar una pieza en vez de otra), lo que reduce los errores y mejora el rendimiento y la productividad. También puede representar visualmente las tensiones que soporta un equipo físico y, cuando aparece un problema, generar imágenes en tiempo real para localizarlo.

Consultoras financieras como ABI Research, IDC y Digi-Capital creen que la realidad aumentada no tardará en popularizarse. Esperan que el mercado global de realidad aumentada, hoy valorado en unos 1500 millones de dólares, crezca hasta los 100.000 millones en 2020. Las principales compañías tecnológicas, como Apple, Google y Microsoft, destinan ingentes recursos humanos y económicos a productos y aplicaciones de realidad aumentada y virtual, y el capital de riesgo ya empieza a fluir: en 2017 se invirtieron 3000 millones de dólares, la mitad de ellos solo en el último trimestre. Hace poco, el *Harvard Business Review* destacó la realidad aumentada como una tecnología transformadora que afectará a todas las empresas.

No obstante, aún persisten obstáculos. Por ahora, las limitaciones en los equipos informáticos y en el ancho de banda de las comunicaciones imponen barreras para extender su uso cotidiano. Por ejemplo, en muchas aplicaciones para museos y viajes deben descargarse datos con antelación y, aun así, la calidad de los gráficos puede que no satisfaga las expectativas de los usuarios. Sin embargo, cabe esperar que el sector crezca de manera notable a medida que se desarrollen chips móviles para realidad aumentada más baratos y rápidos, aparezcan gafas inteligentes más versátiles y aumente el ancho de banda. En ese momento, la realidad aumentada, unida a Internet y a los vídeos en tiempo real, pasará a formar parte de nuestra vida cotidiana.

COMITÉ DE EXPERTOS

Mariette DiChristina, presidenta del comité, es redactora jefa de *Scientific American* y directora de edición, publicación y revistas de Springer Nature. Entre 2014 y 2016 fue vicepresidenta del Metaconsejo de Tecnologías Emergentes, uno de los Consejos para una Agenda Global del Foro Económico Mundial.

Bernard S. Meyerson, vicepresidente del comité, es director de innovación de IBM. Miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de EE.UU., ha recibido numerosos galardones por sus trabajos en física, ingeniería y economía. Entre 2014 y 2016 fue presidente del Metaconsejo de Tecnologías Emergentes del Foro Económico Mundial, y entre 2016 y 2018 presidió el Consejo de Materiales Avanzados.

Habiba Alsafar es profesora adjunta de ingeniería biomédica y directora del Centro de Excelencia de Biotecnología de la Universidad de Khalifa (Emiratos Árabes Unidos). Su trabajo se centra en la identificación de segmentos genómicos que predisponen a las personas a enfermedades cada vez más extendidas en las comunidades de su país. Fue miembro del Consejo de Biotecnología del Foro Económico Mundial (2016-2018).

Alán Aspuru-Guzik es profesor de química y ciencias de la computación en la Universidad de Toronto y miembro del Instituto Vector de Inteligencia Artificial. Es cofundador de Zapata Computing y Kebotix, y ostenta una cátedra en el programa Canadá 150 de Química Teórica y Cuántica. Entre 2016 y 2018 ha participado en el Consejo de Materiales Avanzados del Foro Económico Mundial.

Jeff Carbeck es fundador de varias empresas y director ejecutivo de 10EQS, una iniciativa que, mediante colaboraciones abiertas distribuidas, reúne el conocimiento de expertos para solucionar problemas de negocios. Entre 2016 y 2018 fue miembro del Consejo de Materiales Avanzados del Foro Económico Mundial.

Rona Chandrawati formó parte de los 50 Jóvenes Científicos menores de 40 años elegidos por el Foro Económico Mundial en 2018 y forma parte de su Red de Expertos. Es profesora en la Universidad de Nueva Gales del Sur y directora del Laboratorio de Nanotecnología para Alimentación y Medicina. Su investigación se centra en el desarrollo de materiales bioinspirados para administrar y detectar fármacos.

Cynthia H. Collins es profesora adjunta de ingeniería química y biológica en el Instituto Politécnico de Rensselaer, donde aplica enfoques interdisciplinarios —desde la biología sintética y la genómica microbiana hasta los macrodatos— para estudiar diversos microbiomas y diseñar microorganismos con propiedades útiles. Fue elegida Joven Científica del Foro Económico Mundial en 2016 y ha sido miembro del Consejo de Biotecnología (2016-2018).

Seth Fletcher es editor jefe de las secciones especializadas de *Scientific American*.

Javier García Martínez es profesor de química inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante. Es cofundador de Rive Technology, una empresa escindida del Instituto de Tecnología de Massachusetts que comercializa catalizadores nanoestructurados; miembro del Comité Ejecutivo de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, y pertenece también a la Red de Expertos del Foro Económico Mundial. Ha publicado numerosos artículos sobre nanomateriales, catálisis y energía.

Hiroaki Kitano, experto en inteligencia artificial y biología de sistemas, es presidente y director ejecutivo del Laboratorio de Ciencias de la Computación de Sony y director del Instituto de Biología de Sistemas, ambos en Tokio. Entre 2016 y 2018 ha sido miembro de varios Consejos para el Futuro Global del Foro Económico Mundial, incluido el de Inteligencia Artificial y Robótica.

Corinna E. Lathan es cofundadora y directora ejecutiva de AnthroTronix, una empresa de investigación y desarrollo en ingeniería biomédica que crea productos de salud digital, tecnología ponible, robótica y realidad aumentada. Forma parte de la junta de PTC, un proveedor de Internet de las Cosas y plataformas de realidad aumentada. Lathan fue elegida Joven Líder Global y Pionera Tecnológica por el Foro Económico Mundial, y de 2016 a 2018 fue presidenta del Consejo de Perfeccionamiento Humano.

Geoffrey Ling, coronel retirado del Ejército de EE.UU., es profesor de neurología en la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados y en la Universidad Johns Hopkins. Experto en desarrollo de tecnología y transición comercial, ha ocupado cargos de dirección en la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa y en la Oficina de Ciencia, Tecnología y Política de la Casa Blanca durante el mandato de Barack Obama. Ha sido miembro del Consejo de Neurotecnologías del Foro Económico Mundial (2016-2018).

Andrew Maynard es profesor en la Escuela para el Futuro de la Innovación de la Sociedad, de la Universidad Estatal de Arizona, y autor del libro *Films from the future: The technology and morality of sci-fi movies*. Su trabajo se centra en el desarrollo y uso responsable de tecnologías emergentes. Entre 2016 y 2018 ha sido miembro del Consejo de Tecnología, Valores y Política del Foro Económico Mundial.

Elizabeth O'Day es directora ejecutiva y fundadora de Olaris Therapeutics, empresa especializada en medicina de precisión ubicada en Cambridge (Massachusetts), y miembro anterior del Consejo de Biotecnología (2016-2018). También ha fundado Lizzard Fashion, Proyecto Chispa, Mujeres en Ciencia y Tecnología y PhiSB.

Sang Yup Lee, copresidente entre 2016 y 2018 del Consejo Mundial Futuro de Biotecnología, es profesor distinguido de ingeniería química y biomolecular en el Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de Corea (KAIS T). Cuenta en su haber con más de 630 patentes.

AUTOR INVITADO

G. Owen Schaefer es profesor adjunto de investigación en el Centro de Ética Biomédica de la Escuela de Medicina Yong Loo Lin, de la Universidad Nacional de Singapur. Estudia la ética del desarrollo de nuevas biotecnologías y ha escrito sobre la ética del perfeccionamiento humano, la genética, los macrodatos, la reproducción asistida y la carne in vitro. Fue miembro del Consejo de Tecnología, Valores y Política (2016-2018).



MEDICINA

«ELECTRO-CÉUTICA»

LA NEUROESTIMULACIÓN PODRÍA SUSTITUIR LOS MEDICAMENTOS EN NUMEROSAS ENFERMEDADES CRÓNICAS

Por Geoffrey Ling y Corinna E. Lathan

Los dispositivos denominados «electrocéuticos», que tratan dolencias diversas con impulsos eléctricos, no son nuevos en medicina. Piénsese en los marcapasos para el corazón, los implantes cocleares para los oídos y la estimulación cerebral profunda para el párkinson. Una de las técnicas que resultará más versátil y mejorará de manera drástica la atención de un gran número de enfermedades conlleva la aplicación de impulsos eléctricos en el nervio vago, el cual se encarga de enviar señales desde el tronco encefálico hasta la mayoría de los órganos y, a la inversa, de estos al tronco encefálico.

Las nuevas terapias basadas en la estimulación del nervio vago (ENV) han sido posibles gracias en parte a la investigación realizada por Kevin Tracey, del Instituto Feinstein de Investigación Médica, y sus colaboradores, la cual revela que el nervio vago segrega sustancias que ayudan a regular el sistema inmunitario. La liberación de cierto neurotransmisor en el bazo, por ejemplo, silencia las células inmunitarias responsables de la inflamación en cualquier zona del cuerpo. Estos hallazgos sugieren que la ENV podría aplicarse en otras enfermedades, aparte de las caracterizadas por una alteración de la señalización eléctrica, como las afecciones autoinmunitarias y las inflamatorias. Para las personas que las padecen supondría un importante alivio, pues los medicamentos existentes a menudo fallan o causan graves efectos secundarios. La ENV se toleraría más fácilmente porque actúa sobre un nervio específico, mientras que los fármacos pueden dañar otros tejidos debido a que suelen difundirse por todo el organismo, aparte del lugar en el que se quiere intervenir.

Hasta ahora, los estudios sobre la aplicación de la ENV en procesos inflamatorios arrojan resultados alentadores. En los primeros ensayos en humanos, los dispositivos desarrollados por la empresa SetPoint Medical (cofundada por Tracey) han demostrado ser seguros para tratar la artritis reumatoide, que provoca una dolorosa inflamación y deformación de las articulaciones, y la enfermedad de Crohn, que produce inflamación del intestino. En ambos casos se siguen llevando a cabo ensayos clínicos. Por otro lado, también se está considerando la terapia electrocéutica para otras dolencias que tienen un componente inflamatorio, como las enfermedades cardiovasculares, los trastornos metabólicos y la demencia, así como para las enfermedades autoinmunitarias, como el lupus, en las que el nervio vago presenta una menor actividad. Prevenir los rechazos de tejidos trasplantados sería otra posible aplicación.

La mayoría de estimuladores del nervio vago, incluidos los dispositivos de SetPoint y los que ya se emplean para tratar la epilepsia y la depresión, son implantes subcutáneos que suelen colocarse por debajo de la clavícula. Una rama del nervio vago se envuelve con cables conectados al dispositivo y le transmiten impulsos eléctricos a intervalos prefijados; la frecuencia y otros parámetros se ajustan a través de una terminal magnética externa. Los implantes actuales miden alrededor de cuatro centímetros de diámetro, pero se espera que con el tiempo puedan reducirse en tamaño y programarse con mayor precisión.

Recientemente, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) ha aprobado estimuladores portátiles del nervio vago, no invasivos, destinados a aliviar cefaleas en racimos y migrañas, aunque no está claro el modo exacto en que ayudan a paliar tales dolencias. Los dispositivos de mano suministran una moderada estimulación eléctrica al nervio a través de la piel del cuello o a través del oído.

El nervio vago no constituye el único objetivo de los nuevos procedimientos electrocéuticos. A finales de 2017, la FDA aprobó un dispositivo no implantado que facilita el abandono del consumo de opioides enviando señales a las ramas de los nervios craneales y occipitales por vía cutánea detrás de la oreja. El dispositivo obtuvo el visto bueno de la FDA después de que 73 pacientes con síndrome de abstinencia de opioides mostraran una mitigación de los síntomas superior al 31 por ciento.

La estimulación del nervio vago podría tratar enfermedades autoinmunitarias e inflamatorias, además de neurológicas

El coste de los implantes y la cirugía podría obstaculizar la aceptación generalizada de la terapia por ENV, aunque el problema debería disminuir a medida que la técnica se vuelva menos invasiva. Sin embargo, no es el único reto al que se enfrentan los investigadores, que aún han de aprender más acerca de cómo actúa la ENV sobre cada una de las enfermedades y de cómo establecer los patrones óptimos de estimulación para cada paciente. Y tampoco puede descartarse que los impulsos dirigidos al nervio vago afecten negativamente a los nervios circundantes.

No obstante, cabe esperar que los estudios y ensayos que examinan los mecanismos y los efectos de la ENV y otros dispositivos electrocéuticos conduzcan a la larga a tratamientos más eficaces para una amplia gama de trastornos crónicos, lo que reduciría el empleo de fármacos en millones de pacientes.



BIOTECNOLOGÍA

3

FABRICAR CARNE A PARTIR DE CÉLULAS MADRE

COMER TERNERA SIN MATAR ANIMALES NI DAÑAR EL AMBIENTE

Por G. Owen Schaefer

Imagínese dándole un bocado a una jugosa hamburguesa que se ha producido sin matar ninguna res. Pues bien, la carne obtenida en laboratorio a partir de cultivos celulares está convirtiendo tal visión en una realidad. Ya han emergido nuevas empresas, como Mosa Meat, Memphis Meats, SuperMeat y Finless Foods, dedicadas a obtener carne de ternera, cerdo, pollo y marisco in vitro. Se trata de un sector que seduce a los inversores. En 2017, Memphis Meats recibió una financiación de 17 millones de dólares de fuentes entre las que figuraban Bill Gates y la empresa agrícola Cargill.

Si se generalizara su consumo, la carne de laboratorio, también llamada «carne limpia», podría acabar con buena parte de las prácticas, a menudo crueles y poco éticas, a las que se somete el ganado. Además, disminuirían los costes ambientales asociados a la producción cárnica; se necesitarían recursos tan solo para generar y mantener cultivos celulares, en lugar de organismos enteros desde el nacimiento.

Para su fabricación, primero se toma una muestra del músculo del animal. A continuación, los técnicos extraen células madre y las multiplican, permitiendo su diferenciación en fibras primitivas que, al unirse, formarán el tejido muscular. Mosa Meat asegura que a partir de una sola muestra puede obtenerse suficiente tejido muscular para producir unas 80.000 hamburguesas.

Diversas empresas emergentes confían en tener sus productos a la venta dentro de unos pocos años. Sin embargo, la carne limpia habrá de vencer una serie de barreras para ser viable comercialmente.

Dos de ellas son el precio y el sabor. En 2013 se presentó a los periodistas una hamburguesa hecha con carne de laboratorio cuya producción había costado más de 300.000 dólares y que, por su bajo contenido en grasa, estaba demasiado seca. Desde entonces los costes han descendido. Memphis Meats informó este año de que 125 gramos de su carne picada cuesta unos 600 dólares. Dada la tendencia, dentro de unos años la carne limpia podría llegar a competir con la tradicional. Por otro lado, la cuestión del sabor podría abordarse prestando atención a la textura y con una acertada adición de ingredientes.

Para conseguir la aceptación del mercado deberá demostrarse que ingerir la carne sintética es seguro. Aunque no existe ninguna razón para pensar que representará un peligro para la salud, por el momento la FDA solo ha empezado a considerar cómo debe regularse. Mientras tanto, los productores tradicionales expresan su rechazo y argumentan que la obtenida en laboratorio no es carne de verdad y, por lo tanto, no debería etiquetarse como tal; además, las encuestas indican que el público no se muestra muy entusiasmado por comer carne de laboratorio. No obstante, a pesar de estos retos, las empresas de carne limpia continúan en auge. Si logran crear productos con sabor auténtico a precios asequibles, la carne in vitro podría modificar nuestros hábitos alimentarios, haciéndolos más éticos y sostenibles con el ambiente.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

PROGRAMAS QUE DEBATEN Y QUE ENSEÑAN

NUEVOS ALGORITMOS PERMITIRÁN QUE LOS DISPOSITIVOS PERSONALES APRENDAN LO SUFICIENTE DE CUALQUIER TEMA PARA DEBATIR SOBRE ÉL

Por Bernard S. Meyerson

Aunque los asistentes virtuales actuales pueden llegar a convencernos de que son casi humanos, pronto veremos aparecer otros mucho más competentes. Entre bastidores, Siri, Alexa y compañía emplean complejos programas de reconocimiento de voz para entender qué les pedimos y, con un lenguaje natural, ofrecen respuestas habladas, preparadas de antemano y acordes a las preguntas. Para ello, estos sistemas tienen primero que «entrenarse»; es decir, exponerse a innumerables ejemplos de los tipos más habituales de peticiones que hacemos los humanos. Los programadores escriben las respuestas apropiadas y las organizan en formatos de datos altamente estructurados.

Sin embargo, ese trabajo consume tiempo y da lugar a asistentes limitados. Estos sistemas están programados para «aprender» (sus algoritmos de aprendizaje automático les permiten mejorar la concordancia entre las preguntas que reciben y las respuestas que dan), pero solo hasta cierto punto.

Con todo, ya se están desarrollando técnicas para que la próxima generación de dispositivos inteligentes sea capaz de asimilar y organizar datos no estructurados procedentes de una miríada de fuentes (datos en bruto en forma de texto, vídeos, fotografías, audios, correos electrónicos, etcétera) y, después, elaboren de manera autónoma consejos convincentes o debatan con su interlocutor sobre un tema para el que nunca recibieron ningún tipo de instrucción.

Ya hay destellos de esas nuevas habilidades en sitios web que disponen de chats en los que un programa es capaz de responder en lenguaje natural a preguntas que cubren amplios y variados conjuntos de datos. Estos *bots* apenas necesitan entrenamiento sobre preguntas o peticiones específicas: usan una combinación de datos preconfigurados y la capacidad emergente de «leer» el material de referencia relevante que se les suministra. No obstante, se requiere una cierta preparación para reconocer palabras e intenciones antes de que puedan ofrecer respuestas precisas.

En junio, IBM presentó una versión más avanzada: un sistema que podía mantener en tiempo real un debate con un experto humano sin haber recibido entrenamiento previo sobre el tema ni sobre la posición que debía defender. Usando datos no estructurados (incluido el contenido de Wikipedia, parte del cual se editó para que resultara más claro), el sistema tenía que determinar la relevancia y la veracidad de la información y organizarla en un recurso reutilizable al que pudiera acudir para plasmar argumentos coherentes que respaldaran la postura que se le había asignado. Además, debía replicar a su oponente humano. El sistema se enzarzó en dos debates durante la demostración, y un nutrido grupo de espectadores juzgó que en uno de ellos había salido vencedor.

La tecnología que lo hizo posible (que incluía un programa que no solo entendía el lenguaje natural, sino que también sabía lidiar con el complicado reto de detectar opiniones positivas y negativas) lleva desarrollándose desde hace más de cinco años. Sin embargo, el hecho de que una máquina inteligente sin guion predefinido derrotara a un reconocido experto humano abre la puerta a incontables aplicaciones que podrían surgir en un plazo de tres a cinco años, si no antes. Un sistema de este tipo ayudaría a un médico a encontrar rápidamente investigaciones relevantes para un caso complejo, así como a discutir las ventajas de un tratamiento dado.

Estos sistemas solo servirán para articular el conocimiento existente, no para crearlo, tal y como haría un experto o un científico. No obstante, el fantasma de la pérdida de empleo aumentará conforme las máquinas se tornen más y más inteligentes. Ante esa situación, la sociedad deberá dotar a la próxima generación de las destrezas necesarias para resolver aquellos problemas cuya solución dependa del ingenio humano.

BIOTECNOLOGÍA



CÉLULAS IMPLANTABLES QUE PRODUCEN FÁRMACOS

LOS MEDICAMENTOS PUEDEN LIBERARSE EN EL ORGANISMO SEGÚN SE NECESITEN, SIN SER ATACADOS POR EL SISTEMA INMUNITARIO

Por Sang Yup Lee

Muchas personas con diabetes se pinchan los dedos varias veces al día para medir los niveles de azúcar en sangre y decidir las dosis de insulina que necesitan. Este incómodo proceso se eliminaría con implantes de células de los islotes pancreáticos (los encargados de producir insulina en el cuerpo). Además, los implantes podrían transformar el tratamiento de otras enfermedades, como el cáncer, la insuficiencia cardíaca, la hemofilia, el glaucoma y el párkinson. Sin embargo, plantean un gran inconveniente: para evitar el rechazo del sistema inmunitario, los pacientes deberían tomar inmunodepresores indefinidamente. Estos medicamentos pueden tener efectos secundarios graves, pues elevan el riesgo de padecer infecciones o tumores malignos.

A lo largo de los años, se han concebido formas de encerrar células en membranas protectoras semipermeables que evitan que el sistema inmunitario ataque a los implantes. Estas cápsulas permiten que los nutrientes y otras moléculas pequeñas penetren en su interior y que las hormonas necesarias u otras proteínas terapéuticas fluyan hacia el exterior. Sin embargo, no basta con mantener las células fuera de peligro: si el sistema inmunitario identifica el material protector como un cuerpo extraño, provocará el crecimiento de tejido cicatricial alrededor de las cápsulas. Esta «fibrosis» impedirá que los nutrientes lleguen a las células y les provocará la muerte.

Ahora se está empezando a resolver el problema de la fibrosis. En 2016, un equipo del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) publicó un método que volvía invisibles los implantes para el sistema inmunitario. Después de fabricar y evaluar cientos de materiales, los investigadores se decantaron por una versión químicamente modificada del alginato, un gel que desde hace tiempo ha demostrado ser inocuo para el organismo. Cuando implantaron en ratones diabéticos islotes pancreáticos encapsulados en este gel, las células empezaron a producir insulina como respuesta a las variaciones del nivel de glucosa en sangre, manteniéndolo bajo control durante los seis meses del estudio. No se observó ningún indicio de fibrosis. En otro trabajo, el equipo informó sobre la posibilidad de impedir la cicatrización inhibiendo cierta molécula (el receptor del factor 1 estimulante de colonias) de los macrófagos, células inmunitarias que intervienen en la fibrosis. La adición de esa sustancia debería mejorar la supervivencia de los implantes.

Se han fundado diversas empresas con el objetivo de desarrollar terapias de células encapsuladas. Sigilon Therapeutics ha logrado avances con la técnica del MIT en el diseño de tratamientos para la diabetes, la hemofilia y un trastorno metabólico llamado enfermedad de almacenamiento lisosómico. La compañía farmacéutica Eli Lilly se ha asociado con Sigilon en el trabajo sobre la diabetes. Hay otras iniciativas: Semma Therapeutics se centra también en la diabetes, aunque dispone de su propia técnica; Neurotech Pharmaceuticals ensaya implantes para tratar el glaucoma y otros trastornos caracterizados por la degeneración de la retina; Living Cell Technologies investiga implantes para tratar el párkinson y está desarrollando terapias para otras afecciones neurodegenerativas.

Hoy las células implantables se extraen de animales o cadáveres humanos, o se derivan de células madre humanas. En un futuro, los implantes podrían incluir una mayor variedad de células obtenidas mediante biología sintética. En ella se reprograma el genoma de una célula para que ejerza funciones nuevas, como la secreción controlada y bajo demanda de las moléculas de un fármaco en cierto tejido. No obstante, aún nos hallamos en una fase temprana. Ni la seguridad ni la eficacia de los implantes se han investigado en grandes ensayos clínicos, pero los indicios se antojan alentadores.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

DISEÑO MOLECULAR ASISTIDO

LOS ALGORITMOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO ESTÁN ACELERANDO LA BÚSQUEDA DE NUEVOS FÁRMACOS Y MATERIALES

Por Jeff Carbeck

¿Quiere diseñar un nuevo material fotovoltaico, un medicamento para combatir el cáncer o un compuesto que impida que un virus ataque una cosecha? En tal caso deberá afrontar dos retos: encontrar la estructura molecular correcta y determinar qué reacciones químicas la sintetizarán.

Hasta ahora, las soluciones han llegado de complejas conjeturas sumadas a hallazgos accidentales: un proceso muy costoso en términos de tiempo y en el que abundan los intentos fallidos. Un plan de síntesis, por ejemplo, puede constar de cientos de etapas, muchas de las cuales sencillamente no funcionarán o darán lugar a reacciones secundarias y subproductos no deseados. Sin embargo, la inteligencia artificial está permitiendo aumentar la eficiencia de las fases de diseño y síntesis. Con ello se consigue que la labor sea más rápida, fácil y económica, al tiempo que menos contaminante.

En un sistema de inteligencia artificial, los algoritmos de aprendizaje automático analizan los experimentos pasados que han intentado descubrir y sintetizar las sustancias de interés: los que funcionaron y, lo más importante, también los que fallaron. A partir de las pautas que extraen de ellos, predicen la estructura de nuevas moléculas potencialmente útiles y los posibles métodos para fabricarlas. Y aunque ninguna herramienta de aprendizaje automático es capaz de realizar todo eso con solo apretar un botón, la tecnología está avanzando con rapidez hacia el diseño práctico de materiales y moléculas farmacológicas. Por ejemplo, una herramienta desarrollada por investigadores de la Universidad de Münster simula repetidamente los 12,4 millones de reacciones elementales conocidas para crear una ruta de síntesis de múltiples etapas, la cual logra planificar 30 veces más rápido que los humanos.

En el ámbito farmacéutico despierta interés una técnica denominada aprendizaje automático generativo. La mayoría de las compañías almacenan millones de compuestos que se evalúan selectivamente en busca de nuevos medicamentos. Sin embargo, aun con la robótica y los instrumentos automatizados de laboratorio, este proceso de detección es lento y con pocos aciertos. Además, las «bibliotecas» incluyen una fracción mínima del quintillón (10^{30}) de moléculas en teoría posibles. Las herramientas de aprendizaje automático, en cambio, emplean datos que describen la estructura química y las propiedades de los fármacos conocidos y los candidatos, y pueden construir bibliotecas virtuales de nuevos compuestos con características similares y presumiblemente más útiles. Gracias a ello, la identificación de medicamentos potenciales ha experimentado una drástica aceleración.

Cerca de cien empresas emergentes han empezado a explorar la aplicación de la inteligencia artificial al descubrimiento de fármacos. Entre ellas figuran Insilico Medicine, Kebotix y BenevolentAI. Esta última ha recaudado 115 millones de dólares para extender su tecnología a la investigación de medicamentos para enfermedades de las neuronas motoras, el párkinson y otros trastornos difíciles de tratar. BenevolentAI aplica inteligencia artificial a todo el proceso de desarrollo, desde el descubrimiento de nuevas moléculas hasta el diseño y análisis de ensayos clínicos destinados a demostrar su seguridad y eficacia en humanos.

En el campo de los materiales, empresas como Citrine Informatics usan enfoques similares y se han asociado con grandes compañías como BASF y Panasonic para acelerar las innovaciones. Y el Gobierno de EE.UU. ya ha comenzado a fomentar el diseño asistido por inteligencia artificial: desde el año 2011 ha invertido más de 250 millones de dólares en la Iniciativa Genoma de Materiales, que establece una infraestructura que engloba la inteligencia artificial y otras estrategias computacionales para acelerar el desarrollo de materiales avanzados.

La experiencia pasada nos dice que los nuevos materiales y sustancias químicas pueden presentar riesgos imprevistos para la salud y la seguridad. Por fortuna, las técnicas de inteligencia artificial deberían anticipar y atenuar los efectos no deseados. Los distintos métodos parecen estar preparados para aumentar de forma notable la velocidad con que se descubren materiales y moléculas. Una vez que lleguen al mercado, redundarán en beneficios como una mejor atención médica, una agricultura más eficiente, una mayor conservación de los recursos y sistemas perfeccionados de producción y almacenamiento de energías renovables.

MEDICINA



DIAGNÓSTICOS AVANZADOS PARA UNA MEDICINA DE PRECISIÓN

UNA NUEVA GENERACIÓN DE TÉCNICAS PODRÍA AYUDAR A PONER FIN A LOS TRATAMIENTOS UNIVERSALES

Por Elizabeth O'Day y Habiba Alsafar

Durante buena parte del siglo XX, todas las mujeres que padecían cáncer de mama recibían un tratamiento similar. Desde entonces, las terapias son cada vez más

individualizadas: ahora esos tumores se clasifican en varios subtipos y se tratan en consecuencia. Por ejemplo, muchas mujeres cuyo cáncer produce receptores de estrógeno toman medicamentos que actúan sobre ellos, además de someterse a la quimioterapia estándar posoperatoria. Y en 2018 se dio un paso más hacia un tratamiento aún más personalizado. Se descubrió que una parte importante de las pacientes presentan tumores cuyas características indican que pueden prescindir sin peligro de la quimioterapia (y evitar sus efectos secundarios, a menudo graves).

Esta evolución hacia una medicina personalizada o de precisión está acelerándose en numerosas enfermedades gracias a los avances en las técnicas de diagnóstico. Estas ayudan a los médicos a detectar y cuantificar múltiples biomarcadores (moléculas que señalan la presencia de un trastorno) para dividir los pacientes en grupos que difieren en la propensión a padecer una enfermedad, en el pronóstico o en la probabilidad de responder a cierto tratamiento.

Las primeras herramientas de diagnóstico molecular se fijaban en una sola molécula, como la glucosa en la diabetes. Sin embargo, en el último decenio, la tecnología «ómica» ha experimentado un formidable progreso: en la capacidad para secuenciar de forma rápida, fiable y económica el genoma completo de un individuo, o para medir los niveles de proteínas (el proteoma), los subproductos metabólicos (el metaboloma) o los microorganismos (el microbioma) en un fluido corporal o muestra de tejido. Al mismo tiempo, su uso sistemático ha empezado a generar enormes conjuntos de datos que la inteligencia artificial puede analizar para descubrir nuevos biomarcadores. La combinación de la tecnología ómica de alto rendimiento y la inteligencia artificial marca el preludio de una nueva era de diagnósticos avanzados que transformarán la comprensión y el tratamiento de numerosas enfermedades y permitirán ajustar las terapias a los perfiles moleculares de cada paciente.

Algunas pruebas diagnósticas avanzadas ya se utilizan en el cáncer. Una de ellas, Oncotype DX, examina 21 genes; es la que reveló que muchas mujeres con cáncer de mama podían prescindir de la quimioterapia. Otra, FoundationOne CDx, detecta mutaciones genéticas en más de 300 genes en tumores sólidos y propone fármacos dirigidos a genes que podrían servir a un determinado paciente.

Fuera del cáncer, la empresa Dot-Labs aplica una prometedora herramienta a la endometriosis, una afección que se produce cuando crece tejido uterino donde no le corresponde. El diagnóstico suele implicar cirugía, pero un nuevo análisis de la saliva permite detectar la enfermedad midiendo el perfil de pequeñas moléculas conocidas como microARN. También se están desarrollando varias pruebas sanguíneas para identificar trastornos cerebrales, como el autismo, el párkinson y el alzhéimer, que hoy se diagnostican mediante evaluaciones subjetivas de los síntomas. Otras investigaciones exploran si la secuenciación completa de genomas, el análisis de microbiomas y los niveles de cientos de proteínas y metabolitos en sujetos sanos podrían servir para prevenir enfermedades en ellos.

Una advertencia: las instalaciones médicas y los investigadores que utilizan pruebas de carácter tan íntimo deben salvaguardar rigurosamente la privacidad del paciente. Además, se necesitan pautas reguladoras claras para determinar el valor de un biomarcador como herramienta diagnóstica. Con ellas se acelerará la introducción de nuevos biomarcadores en la práctica médica.

Las técnicas diagnósticas avanzadas han empezado a reducir el peso de la metodología estándar para diagnosticar y tratar enfermedades. Al guiar a los pacientes hacia terapias más eficaces, pueden disminuir incluso el gasto en sanidad. En el futuro, muchos de nosotros dispondremos de una nube personal de datos de biomarcadores que se acumularán con el tiempo e informarán de nuestro tratamiento sin importar dónde busquemos atención médica.



BIOTECNOLOGÍA

IMPULSO GÉNICO MÁS SEGURO

DISMINUIR EL RIESGO DE UNA TÉCNICA QUE TIENE LA CAPACIDAD DE ALTERAR ESPECIES ENTERAS

Por Cynthia H. Collins

Las investigaciones sobre una técnica de ingeniería genética que puede cambiar de forma permanente los rasgos de una población o incluso de una especie entera progresan con rapidez. El enfoque se denomina impulso génico y consiste en favorecer la transmisión de ciertos genes de los progenitores a un gran número de sus descendientes, de modo que los genes se propaguen en la población con celeridad. La técnica podría resultar de gran ayuda para la humanidad. Permitiría impedir que los insectos contagiaran la malaria y otras infecciones, mejorar el rendimiento de los cultivos alterando las plagas que los atacan, aumentar la resistencia de los corales al estrés ambiental y evitar que especies invasoras destruyan un ecosistema. Sin embargo, los investigadores son muy conscientes de las profundas consecuencias que acarrea modificar una especie, por lo que han empezado a elaborar normas que regulen la transferencia del impulso génico desde el laboratorio hasta el campo y a otros usos más amplios.

Durante decenios, se han considerado diversas formas de explotar el impulso génico para combatir enfermedades y otros problemas. Los esfuerzos se han multiplicado en los últimos años tras la creación de la técnica de edición CRISPR, que facilita la inserción de material genético en puntos concretos de los cromosomas. En 2015, varios artículos refirieron ejemplos de impulso génico mediante CRISPR en levaduras, moscas de la fruta y mosquitos. Uno de ellos describía el impulso de genes asociados a la resistencia al parásito de la malaria en una población de mosquitos, lo que debería limitar su transmisión. En otro, se redujo la fertilidad femenina de otra especie de mosquito.

En 2018 se ensayó el impulso génico mediante CRISPR en ratones, con el que se pretendía manipular el color del pelaje. Aunque funcionó solo en hembras, los resultados respaldan la posibilidad de que esta estrategia ayude a erradicar o modificar ratones u otras poblaciones de mamíferos invasores que amenacen los cultivos o la fauna y la flora, o que transmitan enfermedades.

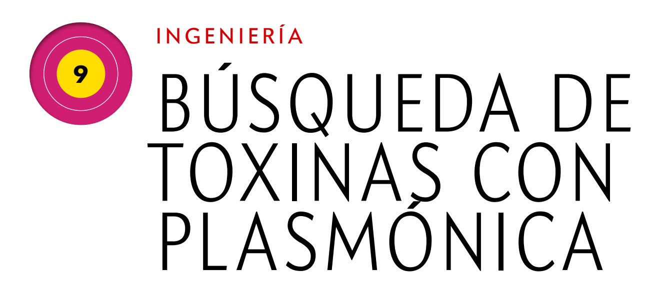
La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de Estados Unidos (DARPA) ha invertido 100 millones de dólares en una investigación orientada a frenar las enfermedades propagadas por mosquitos y roe-

dores invasores. Asimismo, la Fundación Bill y Melinda Gates ha destinado 75 millones de dólares a un consorcio de investigación que trabaja en el impulso génico para combatir la malaria.

Pese a su futuro prometedor, la técnica suscita muchos interrogantes. ¿Podría el impulso génico transmitirse y afectar inadvertidamente a otras especies en la naturaleza? ¿Qué riesgos se correrían al eliminar determinadas especies de un ecosistema? ¿Podrían grupos malintencionados emplear la estrategia como arma para, por ejemplo, interferir en la agricultura?

En un intento por prevenir situaciones tan funestas, un equipo de investigadores ha ideado una suerte de interruptor que debe activarse administrando cierta sustancia antes de que funcione el impulso génico. En paralelo, varios grupos trabajan en protocolos que sirvan de guía para cada etapa de los ensayos. En 2016, las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos revisaron los estudios y recomendaron una serie de prácticas responsables. Y en 2018, un gran grupo internacional elaboró un plan para pasar de los experimentos de laboratorio a la liberación en el campo. El grupo (a algunas de cuyas reuniones asistieron observadores de la DARPA, la Fundación Gates y otras agencias) modeló sus recomendaciones sobre el uso del impulso génico para controlar la malaria en África, donde, según afirma, se obtendría el mayor beneficio para la salud pública.

Más allá de limitar los riesgos de la técnica en sí, muchos investigadores también quieren evitar los incidentes y los traspiés que provocarían su rechazo por parte de la sociedad y los políticos. En un ensayo de 2017 sobre el posible uso del impulso génico para exterminar plagas de mamíferos, Kevin M. Esvelt, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Neil J. Gemmell, de la Universidad de Otago, temían que un incidente internacional pudiera demorar las investigaciones diez años o más. «Solo en el caso de la malaria», predijeron, «el costo de un retraso así podría medirse en los millones de muertes que de otra manera se evitarían.»



INGENIERÍA

BÚSQUEDA DE TOXINAS CON PLASMÓNICA

LOS NANOMATERIALES ACTIVADOS POR LUZ ESTÁN REVOLUCIONANDO LOS SENSORES

Por Javier García Martínez

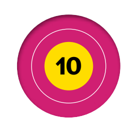
En un artículo publicado en esta revista en 2007, Harry A. Atwater, del Instituto de Tecnología de California, predijo que una técnica que bautizó como «plasmónica» conduciría a aplicaciones que incluirían desde detectores biológicos ultrasensibles hasta capas de invisibilidad. Diez años más tarde, la plasmónica es una realidad comercial, y otras técnicas similares se hallan en transición del laboratorio al mercado.

Estos métodos se basan en controlar la interacción entre un campo electromagnético y los electrones libres de un metal (normalmente oro o plata), los cuales dan cuenta de su conductividad y propiedades ópticas. En la superficie, los electrones libres oscilan de forma conjunta cuando la luz los alcanza, lo que da lugar a un estado conocido como plasmón superficial. En un metal de gran tamaño, los electrones libres reflejan la luz que incide sobre ellos, lo que produce el brillo del material. Sin embargo, en un objeto de pocos nanómetros, los electrones libres se hallan confinados en un espacio muy reducido, lo que limita la frecuencia con que pueden vibrar. Debido a un fenómeno llamado resonancia, el plasmón absorbe solo la fracción de la luz incidente que tiene la misma frecuencia que él, reflejando el resto. Esa resonancia puede explotarse para crear nanoantenas, placas solares eficientes y otros dispositivos.

Entre las aplicaciones más estudiadas se encuentran los sensores para detectar agentes químicos y biológicos. Una de las estrategias consiste en cubrir un nanomaterial plasmónico con una sustancia que se una a la molécula de interés, como una toxina bacteriana. En ausencia de esta, la luz que incide sobre el material es reemitida en un ángulo específico. Sin embargo, en presencia de la toxina variará la frecuencia del plasmón superficial y, con ella, el ángulo de la luz reflejada. Este efecto puede medirse con gran precisión, lo que permite detectar incluso trazas mínimas de la toxina. Diversas empresas emergentes están desarrollando productos basados en esta y otras técnicas relacionadas; entre ellos, un sensor para baterías que permite monitorizar su actividad para aumentar la densidad de potencia y la velocidad de carga, y un dispositivo capaz de distinguir las infecciones víricas de las bacterianas. La plasmónica también encuentra aplicación en soportes de almacenamiento magnético. Por ejemplo, los dispositivos de grabación magnética asistida por calor aumentan su memoria al calentar momentáneamente puntos minúsculos del disco durante la escritura.

En medicina se están probando nanopartículas activadas por luz para tratar el cáncer. Primero las nanopartículas se inyectan en sangre, tras lo cual se concentran en el interior de un tumor. A continuación, se ilumina el conjunto con luz de la misma frecuencia que el plasmón superficial, de modo que las partículas se calientan por resonancia. El calor mata selectivamente las células cancerosas sin dañar el tejido sano circundante.

Las nuevas empresas del ramo deberán asegurar que sus productos gocen de un precio razonable y que sean fiables, resistentes, fáciles de fabricar y sencillos de integrar con otros componentes. Pese al reto, las perspectivas son buenas. El descubrimiento de los metamateriales (materiales sintéticos a escala nanométrica donde los plasmones generan efectos ópticos inusuales) ha permitido emplear materiales distintos del oro y la plata, como el grafeno y los semiconductores. Un análisis de la consultora Future Market Insights predice que el valor de los sensores plasmónicos en el mercado estadounidense crecerá desde los casi 250 millones de dólares de 2017 hasta los 470 en 2027.



COMPUTACIÓN

ALGORITMOS PARA ORDENADORES CUÁNTICOS

YA SE ESTÁN PERFECCIONANDO LOS PRIMEROS PROGRAMAS DESTINADOS A EJECUTARSE EN COMPUTADORAS CUÁNTICAS

Por Alán Aspuru-Guzik

Es posible que, dentro de pocos años, los ordenadores cuánticos alcancen o incluso superen a los tradicionales. Ello no solo se deberá a las mejoras en el diseño físico de estas máquinas, sino también a las logradas en los algoritmos que deberán ejecutar.

Estos aparatos se sirven de la mecánica cuántica para efectuar cálculos. Su unidad básica de información, el qubit, es similar al bit estándar, pero, al contrario que este, puede también hallarse en una superposición simultánea de sus dos estados básicos, cero y uno. Esa propiedad, junto con otro fenómeno cuántico conocido como entrelazamiento, hace que, en principio, los ordenadores cuánticos puedan resolver algunas clases de problemas de forma mucho más eficiente que los tradicionales.

Aunque fascinante, esta tecnología es muy delicada, ya que un proceso conocido como «decoherencia», entre otros, puede interrumpir el funcionamiento de la máquina. Los expertos creen que sería posible construir un ordenador cuántico de hasta miles de qubits y resistente a la decoherencia gracias a ciertas técnicas de corrección de errores cuánticos. Sin embargo, los mayores aparatos mostrados hasta ahora (fabricados por IBM, Google, Rigetti Computing e IonQ) apenas contienen unas decenas de qubits. Estas versiones, que el físico del Instituto de Tecnología de California John Preskill denominó de «escala intermedia ruidosa» (NISQ, por sus siglas en inglés), son aún incapaces de corregir errores. Pero el repentino afán por investigar algoritmos escritos específicamente para sistemas NISQ podría permitir que estos aparatos comenzaran a calcular de manera eficiente.

El hecho de que cada vez más usuarios de todo el mundo hayan podido acceder a máquinas NISQ ha contribuido en gran medida a este progreso, posibilitando que un número creciente de investigadores desarrollen y prueben versiones a pequeña escala de los programas. Al mismo tiempo, está aflorando un ecosistema de empresas emergentes centradas en diferentes aspectos de la programación cuántica.

Los investigadores consideran particularmente prometedores dos tipos de algoritmos: aquellos orientados a simulaciones y los de aprendizaje automático. En 1982, Richard Feynman sugirió que una de las aplicaciones principales de la computación cuántica consistiría en simular la naturaleza misma: átomos, moléculas y materiales. Con este fin, numerosos investigadores hemos desarrollado algoritmos para dispositivos NISQ (así como para los ordenadores cuánticos con corrección de errores del futuro) que podrían mejorar el diseño de nuevos materiales para su uso en sectores que abarcan desde la energía hasta la sanidad.

Los desarrolladores también tratan de evaluar si los ordenadores cuánticos superarán a los clásicos en tareas de aprendizaje automático, las cuales requieren que las máquinas aprendan a partir de grandes conjuntos de datos. Las pruebas efectuadas con un número creciente de algoritmos para dispositivos NISQ han demostrado que, en efecto, los ordenadores cuánticos facilitarían tareas como clasificar información en categorías, agrupar objetos similares y generar nuevas muestras estadísticas a partir de otras ya existentes (por ejemplo, al predecir estructuras moleculares con una mezcla de propiedades). Al menos tres grupos de investigación han referido avances en el desarrollo de versiones cuánticas de una técnica de aprendizaje automático conocida como «redes generativas antagónicas», que en los últimos años ha tomado por asalto la disciplina.

Está aflorando un ecosistema de empresas emergentes centradas en diferentes aspectos de la programación cuántica

Aunque diversos algoritmos parecen funcionar bien en las máquinas NISQ ya existentes, nadie ha obtenido aún una demostración formal de que estos sean más potentes que aquellos que pueden ejecutarse en ordenadores tradicionales. Tales demostraciones son complejas, por lo que podrían tardar años en lograrse. Cabe suponer que, en los próximos años, se desarrollarán dispositivos NISQ más grandes y fáciles de controlar, a los que seguirán máquinas con corrección total de errores y miles de qubits físicos. Quienes trabajamos en este campo somos optimistas: creemos que los algoritmos para dispositivos NISQ serán lo bastante eficientes para aventajar a los ordenadores normales de última generación, aunque para ello puede que haya que esperar hasta que las máquinas con corrección de errores estén disponibles.

EN NUESTRO ARCHIVO

Plasmónica. Harry A. Atwater en *IyC*, junio de 2007.

Carne de laboratorio. Jeffrey Bartholet en *IyC*, agosto de 2011.

Materiales virtuales. Gerbrand Ceder y Kristin Persson en *IyC*, febrero de 2014.

Nanomateriales a la carta. Beatriz H. Juárez y Luis M. Liz Marzán en *IyC*, diciembre de 2014.

Medicina bioelectrónica. Kevin J. Tracey en *IyC*, junio de 2015.

Riesgos de la edición genética. Jeantine Lunshof en *IyC*, agosto de 2015.

Computación cuántica modular. Christopher R. Monroe, Robert J. Schoelkopf y Mikhail D. Lukin en *IyC*, julio de 2016.

Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.

UN FÓSIL HUMANO



ARQUEOLOGÍA

Una nueva técnica que identifica fragmentos diminutos de hueso fósil ayuda a responder preguntas cruciales sobre el momento, el lugar y el modo en que interaccionaron las especies humanas

Thomas Higham y Katerina Douka

Fotografías de Christoffer Rudquist

LOS FRAGMENTOS FÓSILES más pequeños contienen vestigios humanos preciosos; la cuestión estriba en dar con ellos.



ENTRE UNA MULTITUD

Thomas Higham es director de la Unidad del Acelerador de Radiocarbono de Oxford en la universidad homónima. Sus investigaciones se centran en la datación de restos óseos en yacimientos de Eurasia del Paleolítico Medio y Superior.



Katerina Douka es arqueóloga del Instituto Max Planck de Ciencias de la Historia Humana, en Jena. Dirige un equipo que descubre fósiles de neandertales y denisovanos entre las colecciones de fragmentos óseos no identificados en yacimientos de Asia.

Llegar a la cueva de Denisova, en Siberia meridional, siempre es un alivio. Después de once horas de un movido trayecto al sureste de Novosibirsk, por la estepa y las estribaciones del macizo de Altái, el campamento surge de repente tras una curva de la polvorienta carretera. En ese momento toda la incomodidad del largo viaje se esfuma. Los valles escarpados, los ríos de aguas bravas y las tradicionales cabañas de madera de las gentes del Altái dominan el paisaje; las águilas reales sobrevuelan en las alturas. A unos doscientos metros, la cueva horadada en la roca caliza, encaramada sobre el río Anui, ejerce su atracción con la promesa de ofrecer algunos de los descubrimientos más apasionantes sobre los orígenes de la especie humana.



ESTE FRAGMENTO ÓSEO hallado en la cueva siberiana de Denisova corresponde al último espécimen identificado como perteneciente a la familia de los humanos y los simios antropomorfos con el análisis zooarqueológico por espectrometría de masas (ZooMS).

La cueva de Denisova protagoniza una revolución en cuanto a los datos que aporta acerca de cómo nuestros ancestros del Paleolítico (Edad de Piedra Antigua) se comportaron y se relacionaron entre sí. Nuestra especie, *Homo sapiens*, nació en África hace cientos de milenios. Cuando inició su expansión por Europa y Asia, se encontró con otras especies de humanos, como los neandertales, y compartió el planeta con ellos por espacio de milenios hasta que esas especies arcaicas desaparecieron. Sabemos que tales grupos coexistieron porque hoy algunos de nosotros conservamos ADN de parientes extintos, fruto de la hibridación de aquellos primeros *H. sapiens* con miembros de esos otros grupos. Lo que aún no sabemos y ansiamos saber es en qué momento y lugar se cruzaron sus caminos, con qué frecuencia se hibridaron y de qué modo pudieron influir en la cultura de cada cual. Son pocos los yacimientos arqueológicos relevantes de ese período de transición que albergan útiles líticos y otros artefactos. Y en muchos, como en Denisova, no se han hallado restos humanos lo bastante completos para asignarlos a una especie a partir de sus rasgos anatómicos. Esa carencia nos ha impedido atribuir la autoría de los útiles y datar el momento en que se fabricaron.

EN SÍNTESIS

Durante la mitad y la última parte del Paleolítico, *Homo sapiens* colonizó Eurasia desde su África natal. Poco después, los grupos de humanos primitivos que poblaban esa extensa región, los neandertales y los denisovanos, desaparecieron.

Los especialistas ansían conocer la naturaleza y el alcance de las interacciones entre esos grupos durante esa transición. Pero muchos de los yacimientos relevantes del citado período carecen de fósiles que puedan ser atribuidos a una especie concreta en virtud de su anatomía.

Ahora, una combinación de técnicas permite examinar una gran cantidad de fragmentos óseos diminutos no identificados y reconocer entre ellos los humanos, que pueden ser datados y secuenciados genéticamente. Este método ya nos ha ofrecido datos sobre la dinámica interespecífica.

Ahora, una técnica de identificación de fragmentos óseos prehistóricos, denominada análisis zooarqueológico por espectrometría de masas (abreviado ZooMS), al fin está empezando a dar respuestas a esas viejas incógnitas. Mediante el análisis de la proteína de colágeno conservada en esos pequeños fragmentos fósiles aparentemente anodinos, es posible identificar los que proceden de la familia de los humanos y los simios antropomorfos e intentar recuperar su ADN. De ese modo podemos saber a qué especie pertenecieron: neandertal, *H. sapiens* o cualquier otra. Es más, podemos llevar a cabo pruebas para averiguar su antigüedad.

La datación directa de los fósiles es un proceso destructivo; hay que sacrificar una parte del hueso para el análisis. Los conservadores de los museos suelen mostrarse reticentes a someter los huesos más enteros a ese tipo de pruebas. Pero no tienen esos escrúpulos con los pedazos diminutos.

La posibilidad de datar directamente los fósiles hallados junto a los artefactos resulta especialmente fascinante cuando se trata de Denisova y de otros yacimientos donde sabemos que se cobijaron varias especies humanas en el pasado. Algunos entendidos argumentan que los artefactos simbólicos y decorativos, indicadores de la posesión de capacidades cognitivas avanzadas, son privativos del *H. sapiens*. Otros sostienen que los neandertales y otras especies también fabricaron ese tipo de objetos, e incluso transmitieron algunas de sus tradiciones a los *H. sapiens* con los que se encontraron. La posibilidad de identificar y fechar esos fragmentos fósiles significa que podemos comenzar a reconstruir la cronología de esos yacimientos con mucha mayor exactitud y dilucidar un capítulo esencial de la prehistoria humana.

MISIÓN IMPOSIBLE

Las campañas de excavación en la cueva de Denisova se iniciaron en los años 80, de la mano de arqueólogos soviéticos. Pero fue un anuncio hecho en 2010 el que la situó en el mapa. Aquel año, científicos del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, en Leipzig, dieron a conocer los resultados del análisis genético de un hueso desenterrado en ella en 2008. El ADN extraído del fósil (un fragmento de hueso del dedo) reveló un tipo desconocido de hominino, un miembro de la familia humana con un parentesco tan estrecho con los neandertales como el nuestro. El hueso era de una joven, bautizada en aquel momento como «mujer X», perteneciente a un grupo de humanos que hoy llamamos denisovanos. Desde entonces, entre los restos excavados se ha hallado un puñado de huesos y de dientes de homininos, tanto de denisovanos como de neandertales.

Esos descubrimientos en Denisova ponen de manifiesto el valor de la información que puede extraerse de los fósiles con las técnicas genéticas actuales, pues no solo nos revelan la presencia de una especie desconocida hasta la fecha, sino la naturaleza de su interacción con nosotros. Gracias a los análisis genéticos sabemos que los neandertales y los humanos modernos se hibridaron entre sí al menos en tres ocasiones durante los últimos 100.000 años; y que ambos se cruzaron también con

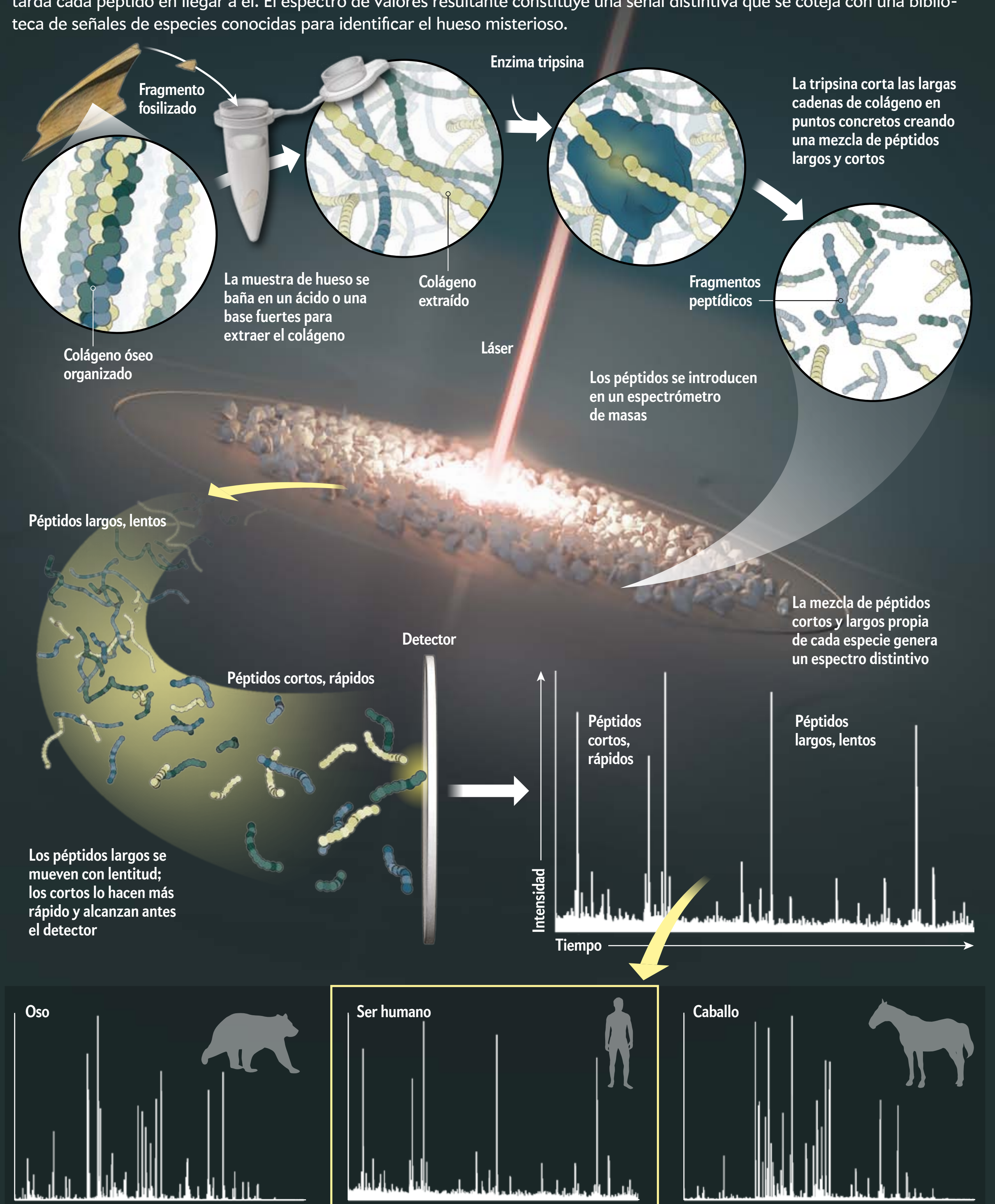


SERGEY ZELINSKY, INSTITUTO DE ARQUEOLOGÍA Y ETNOGRAFÍA DE LA SECCIÓN SIBERIANA DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE RUSIA

UN GRUPO DE INVESTIGADORES inspecciona los estratos arqueológicos en la cueva de Denisova antes de tomar muestras destinadas al análisis con ZooMS y la datación por radiocarbono.

Hallar una aguja en el pajar

El ZooMS permite asignar los fragmentos óseos al grupo taxonómico correcto. Analiza la proteína del colágeno conservada en el hueso. Una enzima divide el colágeno en las cadenas peptídicas que lo componen. Un espectrómetro de masas se sirve de un láser para conferir una carga eléctrica (ionizar) a los péptidos, que después se desplazan hacia un detector que mide cuánto tarda cada péptido en llegar a él. El espectro de valores resultante constituye una señal distintiva que se coteja con una biblioteca de señales de especies conocidas para identificar el hueso misterioso.



FALCONIERI VISUALS

los denisovanos. Como resultado, la visión arraigada de que *H. sapiens* salió de África y simplemente aniquiló a esas poblaciones primitivas ha dado paso, en un abrir y cerrar de ojos, a una situación más compleja de hibridación y de flujo de genes entre grupos, a un modelo de «reemplazo permeable» en el origen de los humanos modernos. Pero la mayoría de los fósiles hallados en Denisova son tan fragmentarios que resulta imposible distinguir cuáles pertenecen a cada especie humana. Además, la datación del yacimiento ha ofrecido notables dificultades.

Nuestra participación en el proyecto de Denisova dio comienzo hace seis años a raíz de nuestra experiencia en cronología, en particular en el uso de la datación por radiocarbono para definir intervalos de tiempo en los yacimientos arqueológicos. En el caso de los restos del Paleolítico Medio (hace entre unos 40.000 y 250.000 años) y del Superior (hace entre unos 10.000 y 40.000 años), la datación reviste suma importancia, pues los yacimientos no suelen albergar los tipos de útiles distintivos que se asocian con períodos definidos con precisión. Trabajamos, pues, para aportar una cronología fiable para Denisova y otros enclaves del Paleolítico en Eurasia.

Ambos coincidimos allí en 2014, en ocasión de una reunión del equipo de Denisova, y concebimos una idea que creímos que podría ayudarnos a elaborar un cuadro más matizado de los contactos entablados por nuestra especie con los neandertales y los denisovanos. Una peculiaridad de Denisova es que todos los restos de hominino son muy diminutos, de apenas tres a cinco centímetros de largo. El hueso del dedo de la mujer X, por ejemplo, tiene el tamaño de una lenteja y pesa menos de 40 miligramos. Gran parte del material óseo hallado en el yacimiento está roto, básicamente por la acción de los depredadores, como las hienas, que se cobijaban en la cueva para parir sus camadas y trituraban los huesos para devorarlos. Desde 2008 se han desenterrado más de 135.000 huesos en Denisova, pero el 95 por ciento no se puede identificar taxonómicamente debido a su estado de fragmentación. En cambio, la conservación de las biomoléculas contenidas en ellos es magnífica: los dos genomas de hominino primitivo mejor conservados pertenecen a fósiles recuperados en la cueva. ¿Y si hubiera algún modo de cribar todos esos miles de fragmentos óseos para dar con más huesos humanos? Si fuera posible, quizá podríamos generar más datos genéticos y cronológicos o incluso descubrir un nuevo tipo de hominino oculto en la cueva. Fue entonces cuando nos percatamos de que podíamos llevar a cabo justamente ese tipo de cribado con el ZooMS.

Esta técnica, llamada también identificación masiva de huellas genéticas (*fingerprinting*) en péptidos del colágeno, permite asignar los fragmentos óseos a su grupo taxonómico analizando las proteínas del hueso. El colágeno óseo es una proteína formada por cientos de pequeños compuestos llamados péptidos que varían ligeramente de una especie a otra. Al cotejar los péptidos de los huesos examinados con los de una biblioteca de péptidos correspondientes a fauna conocida, es posible atribuir esos huesos a la familia, el género, y en ocasiones, a la especie animal correcta. Esta invención de Michael Buckley, ahora en la Universidad de Manchester, y de Matthew Collins, de la Universidad de York, se usa desde hace más de una década para identificar los huesos de animales en yacimientos arqueológicos. Es bastante barata, con un coste de 5 a 10 dólares por muestra, además de poco destructiva, pues el análisis solo exige de 10 a 20 miligramos de hueso. Otra virtud es la rapidez: una persona puede analizar cientos de fragmentos en una semana.

Hasta donde sabíamos, nadie había usado el ZooMS para buscar huesos humanos. Pero decidimos que valía la pena intentarlo. Supusimos que incluso los fragmentos pequeños podían ser útiles, porque gracias a una temperatura media anual inferior a cero grados, el estado de conservación del colágeno óseo y del ADN en Denisova resulta inmejorable. Sabíamos que sería imposible conocer la especie con el ZooMS. Las señales peptídicas del colágeno humano y de los simios antropomorfos se asemejan demasiado para diferenciar ambos grupos. Pero se sabe que en ese rincón del mundo no vagaron grandes simios durante el Paleolítico. Así que si descubríamos un fragmento de hueso perteneciente en principio a un miembro de la familia de los simios antropomorfos y los humanos (los homínidos, Hominidae), cabría suponer con bastante certeza que perteneció a un humano de algún tipo y valdría la pena someterlo al análisis genético que podría darnos la identidad de la especie.

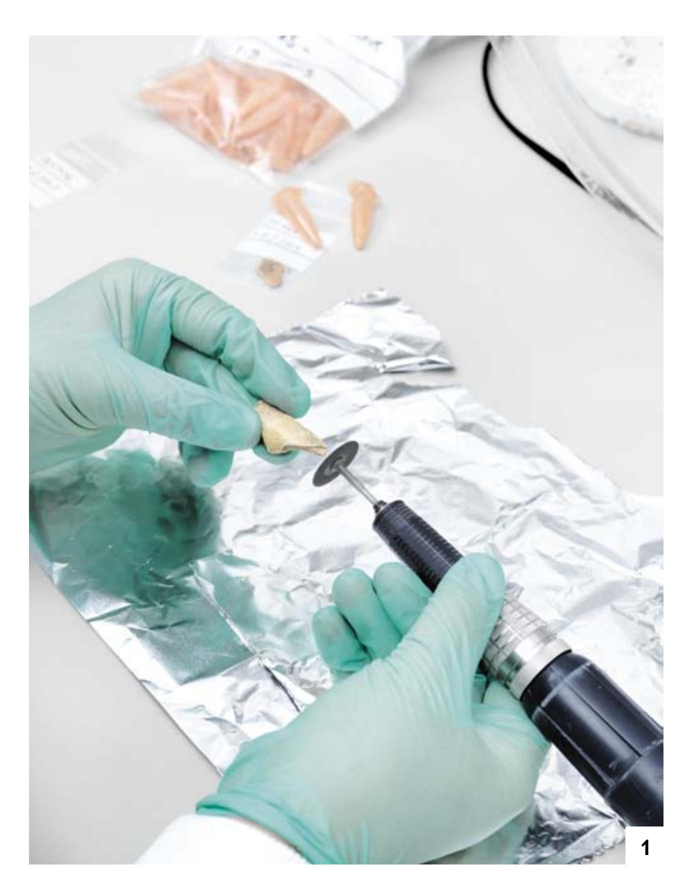
El experto en ADN prehistórico Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, director del Proyecto del Genoma Neandertal y cuyo grupo publicó el genoma denisovano en 2010, se hallaba en Denisova en aquel encuentro de 2014. No le conocíamos formalmente y deseábamos saber su opinión sobre nuestra idea de analizar los fragmentos óseos y si estaría interesado en colaborar en el empeño. Recibió con entusiasmo la idea y nos dio su apoyo de inmediato. A continuación, compartimos nuestro plan con Anatoly Derevianko, de la Academia de Ciencias de Rusia, supervisor de las labores en Denisova, y con Michael Shunkov, director de las excavaciones. Ambos manifestaron su interés. Así que, aquel mismo año, iniciamos el proceso de obtener muestras de miles de fragmentos que, a todos los efectos, eran huesos «sin valor» desenterrados hacía poco en el yacimiento.

Dicho así, parecía que iba a ser un trabajo rápido. En realidad, encarábamos una labor descomunal: sacar cuidadosamente una minúscula muestra ósea de cada fragmento para analizarla, con el cuidado de no tocar los valiosos especímenes con nada que pudiera contaminarlos. Una de nuestras estudiantes, Samantha Brown, que asumió el proyecto para su tesis de máster, llevó a cabo gran parte de esa labor invirtiendo incontables horas en nuestro laboratorio de la Universidad de Oxford.

Buckley colabora con nosotros en este proyecto. Una vez que tuvimos listas 700 u 800 muestras óseas, Brown se las llevó a su laboratorio para prepararlas y analizarlas. Los resultados fueron interesantes: había mamuts, hienas, caballos, renos, rinocerontes lanudos (la panoplia entera de bestias de la Era Glacial), pero, por desgracia, ninguna de las señales peptídicas correspondía a un homínido. Era decepcionante, pero decidimos intentarlo con un segundo lote para ver si dábamos siquiera con un solo hueso humano entre la pila de fragmentos. No nos hicimos grandes ilusiones sobre nuestras posibilidades, pero esperábamos andar equivocados.

Entonces, una tarde del verano de 2015, recibimos un correo electrónico de Buckley. Había verificado que una de las muestras, la DC1227, contenía los marcadores peptídicos propios de los homínidos. Teníamos un fragmento de hueso humano, ¡la proverbial aguja en el pajar! Estalló la euforia; nuestra disparatada idea parecía haber funcionado.

A la mañana siguiente, acudimos temprano a nuestro laboratorio en Oxford para buscar el hueso en el archivo de muestras. Nos disgustó un poco comprobar que el fragmento era minúsculo (apenas 25 milímetros de longitud) aun para ser un espécimen de Denisova, lo que no daba para muchos estudios, que digamos. Por suerte, gracias al excepcional estado




EL ANÁLISIS de los fragmentos fósiles con el ZooMS requiere tomar una muestra de 20 miligramos de cada espécimen minúsculo (*1*). Otras muestras se destinan a la datación por radiocarbono (*2*).

de conservación de los restos en lo que a las biomoléculas se refiere, creímos que bastaría para aplicar las técnicas deseadas y averiguar todo lo posible sobre el hueso. Lo fotografiamos a alta resolución, lo examinamos con TAC y extrajimos nuevas muestras para someterlas a análisis de datación y de isótopos, antes de que Brown se lo llevara a Leipzig para analizar su ADN en el laboratorio de Pääbo.

Semanas después, recibimos los resultados de la datación. La ausencia de cualquier traza de carbono radioactivo en la muestra implicaba que nuestro huesecillo tenía más de 50.000 años. Y poco más tarde, supimos por Pääbo que su ADN mitocondrial (alojado en los orgánulos de la célula que generan la energía y que se hereda de madre a hijo) indicaba que había pertenecido a un individuo cuya madre era neandertal. Habíamos hallado un fragmento óseo de hominino oculto entre miles de huesos «sin valor» y demostrado que la idea era válida. El equipo de Pääbo estaba planeando extraer el genoma nuclear, mucho más informativo, del que llamábamos «Denisova 11», por el nombre del yacimiento fósil, o «Denny», como apodo. Entretanto, decidimos poner a prueba nuestro método en otro yacimiento.

NOSOTROS Y ELLOS

La cueva de Vindija, en Croacia, es un enclave fundamental para conocer a los últimos neandertales de Europa. Durante años las dataciones por radiocarbono indicaron que pudieron haber sobrevivido allí hasta hace 30.000 años, lo cual apunta a una posible coincidencia con los humanos modernos, llegados a la región hace entre 42.000 y 45.000 años. Esa larga coexistencia puede hacer pensar que, más que ser condenados a la extinción por los recién llegados, los neandertales pudieron ser asimilados entre sus filas. Mientras revisábamos la cronología de Vindija, decidimos usar el ZooMS para examinar los huesos no identificados del yacimiento. Trabajos previos con los fósiles más completos hallados allí habían demostrado que el oso de las cavernas predominaba entre los restos, con cerca del 80 por ciento de los huesos, por lo que no esperábamos contar con la diversidad faunística descubierta en Denisova. Cara Kubiak, entonces otra de nuestras estudiantes, se hizo cargo del proyecto.

Para nuestro asombro, la 28ª muestra de las 383 que analizamos arrojó una secuencia peptídica que concordaba con la de un homínido. El equipo de Pääbo confirmó después que pertenecía a un neandertal. El hueso tenía unos siete centímetros de largo y, cosa sorprendente, mostraba muescas de corte y otros signos de manipulación humana. Los fósiles de neandertal presentan a veces ese tipo de marcas, que bien podrían ser pruebas de actos violentos y canibalismo.

El espécimen, llamado Vi-*28, resultó esencial para nuestro trabajo de cronología. Los arqueólogos y los preparadores habitualmente han tratado los huesos de Vindija con conservantes para protegerlos. Esa práctica dificulta sobremanera la datación por radiocarbono, pues tales productos incorporan carbono al hueso. Pero, a diferencia de otros restos humanos del yacimiento, Vi-*28 no se había sometido a ningún proceso de conservación porque, por suerte para nosotros, había sido identificado erróneamente como un hueso de animal. La datación por radiocarbono reveló que había pertenecido a un neandertal de más de 47.000 años. El hallazgo, publicado en

2017, junto con las fechas que obtuvimos de otros neandertales, demostró que habían desaparecido de Vindija hacía más de 40.000 años, antes de que los humanos modernos llegaran al lugar. Los resultados precedentes de la datación, que indicaban que habían sobrevivido hasta hacía al menos 30.000 años, eran erróneos, alterados por el carbono contaminante que no se había podido eliminar. El ZooMS había demostrado de nuevo su valía.

Otros equipos también han cosechado grandes éxitos con la técnica. En 2016, Frido Welker, ahora en el Museo de Historia Natural de Dinamarca, y sus colaboradores comunicaron haber identificado con ella 28 fósiles de homininos entre fragmentos óseos previamente irreconocibles del célebre yacimiento de la cueva de Renne, en la Borgoña francesa. Hace décadas se hallaron en ella huesos de neandertales junto a varios artefactos sorprendentemente refinados, como útiles óseos, colgantes y otros ornamentos corporales, todos ellos elementos de la cultura Châtelperronense, que se considera de transición entre el Paleolítico Medio y el Superior. El descubrimiento ponía en entredicho la idea consolidada de que *H. sapiens* era el único en posesión de tal ingenio y capacidad creativa. Y con ello, se desató un largo debate sobre si los neandertales pudieron ser los verdaderos creadores de esos artefactos refinados o si los niveles arqueológicos del yacimiento habían sido alterados de algún modo, quedando mezclados sus huesos con objetos dejados allí en fecha posterior por *H. sapiens.*

Los 28 fragmentos óseos que el equipo de Welker identificó como humanos con el ZooMS procedían con certeza del mismo estrato que los útiles y los ornamentos. Cuando se secuenciaron, los resultados no dejaron sombra de duda: los restos óseos pertenecían a individuos neandertales, no a *H. sapiens*. El trabajo dio un notable espaldarazo a la hipótesis de que los fabricantes de los útiles châtelperronenses y de otras industrias de transición eran neandertales, que debieron ser más inteligentes e ingeniosos de lo que muchos solían pensar.

UN NIÑO HÍBRIDO

Nuestro trabajo en Vindija no nos impidió proseguir el análisis de las muestras de Denisova, ni renunciar a la esperanza de reunir nuevos fósiles humanos para nuestra colección. El esfuerzo se saldó con dos hallazgos más: DC3573, que resultó pertenecer a un neandertal de más de 50.000 años, y DC3758, un hueso de 46.000 años que lamentablemente no conserva resto alguno de ADN. El análisis de más de 5000 fragmentos óseos ha dado como fruto cinco huesos de homininos que habrían languidecido en el archivo para siempre de no ser por el ZooMS.

Pero el descubrimiento más emocionante estaba por llegar. En mayo de 2017, nos reunimos en el Instituto Max Planck con miembros del laboratorio de Pääbo, entre ellos Matthias Meyer y Janet Kelso. Queríamos saber cómo iban las cosas con Denisova 11 y si habían conseguido recuperar ADN nuclear, que nos daría una visión mucho más detallada de quién había sido su poseedor.

En el campo de la ciencia no se escuchan a menudo noticias que le dejen a uno boquiabierto, pero Meyer y Kelso nos dieron una así. El ADN nuclear estaba curiosamente dividido: la mitad concordaba con el de un neandertal y la otra mitad parecía provenir de un denisovano. Pensaron que Denisova 11 era un híbrido a partes iguales. Para descartar toda posibilidad de error, el equipo estaba analizando de nuevo las muestras para corroborar el sorprendente hallazgo. Meses después, los datos definitivos lo confirmaron. El ADN mitocondrial nos había dado la mitad del retrato. Lo que habíamos encontrado no era un neandertal, sino un individuo de madre neandertal y padre denisovano, un híbrido de la primera generación, en el lenguaje de los genetistas. El equipo de Denisova anunció el insólito descubrimiento el pasado 6 de septiembre en *Nature*, en un artículo encabezado por Viviane Slon, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva.

Gracias al ADN, ahora sabemos que Denisova 11 era una mujer que vivió probablemente hace unos 90.000 o 100.000 años. Y el análisis de la densidad ósea generado con el TAC permitió a nuestro colega Bence Viola, de la Universidad de Toronto, calcular provisionalmente la edad en el momento de la muerte en 13 años o más. Su padre denisovano tuvo un lejano pariente neandertal varios cientos de generaciones antes. Por supuesto, nunca podremos saber cómo sobrevinieron esas uniones en la prehistoria, solo que se consumaron. Tampoco podemos saber cómo murió Denisova 11, solo que sus restos probablemente acabaron depositados en el sedimento de la cueva por un depredador, quizás una hiena.

Nunca sabremos si fue enterrada por sus seres queridos en una ceremonia funeraria y los restos fueron devorados por la hiena después, o si cayó presa de un depredador. Durante decenas de miles de años, ese diminuto pedazo de su cuerpo permaneció imperturbado en la gruta y podría haber seguido así muchos más, de no ser por la ciencia puntera que nos ha permitido dar vida a su historia. Esperamos que el ZooMS nos ayude a desvelar muchos más secretos conservados en los huesos. IyC

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Nuestra historia evolutiva*, el monográfico de la colección TEMAS que recoge los mejores artículos de *Investigación y Ciencia* sobre los hallazgos paleontológicos más recientes que han hecho cambiar las ideas sobre el relato de nuestro intrigante pasado.



www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/92

PARA SABER MÁS

Identification of a new hominin bone from Denisova Cave, Siberia using collagen fingerprinting and mitochondrial DNA analysis. Samantha Brown et al. en *Scientific Reports*, vol. 6, n.º 23559, marzo de 2016.

Palaeoproteomic evidence identifies archaic hominins associated with the Châtelperronian at the Grotte du Renne. Frido Welker et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 113, n.º 40, págs. 11.162-11.167, octubre de 2016.

Direct dating of Neanderthal remains from the site of Vindija Cave and implications for the Middle to Upper Paleolithic transition. Thibaut Devièse et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 114, n.º 40, págs. 10.606-10.611, octubre de 2017.

The genome of the offspring of a Neanderthal mother and a Denisovan father. Viviane Slon et al. en *Nature*, vol. 561, págs. 113-116, septiembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Híbridos humanos. Michael F. Hammer en *IyC*, julio de 2013.

Neandertales y humanos modernos en la península ibérica: encuentros y desencuentros. Manuel Vaquero Rodríguez en *IyC*, octubre de 2018.

El último hominino. Kate Wong en *IyC*, noviembre de 2018.

por Sonia Merinero Mesa

Hongos que habitan líquenes

A la clásica simbiosis entre un hongo y un alga puede unirse un hongo parásito

Según la definición tradicional, un liquen es un organismo resultante de la simbiosis entre un hongo y un alga, donde el hongo suministra un húmedo hogar al alga a cambio de nutrientes. Sin embargo, estudios recientes suman nuevos componentes a la simbiosis. Se trata de hongos que habitan en los líquenes, denominados hongos liquenícolas. Su descubrimiento modifica la visión clásica que se tiene de los líquenes y plantea nuevas preguntas: ¿qué función desempeñan estos hongos en la simbiosis? ¿Su presencia es beneficiosa o perjudicial para el liquen?

Lobaria pulmonaria y *L. scrobiculata* son líquenes que alcanzan gran tamaño y crecen solo sobre árboles de bosques húmedos bien conservados y con un aire muy limpio, típicamente hayedos y robledales; de ahí que su distribución en Europa sea amplia pero su abundancia limitada. Dos hongos liquenícolas del género *Plectocarpon* habitan con frecuencia en estos líquenes. En ellos forman agallas y se reproducen a través de multitud de pequeñas esporas que se dispersan en el aire. No obstante, se sabe muy poco acerca del ciclo de vida de estos hongos y de su influencia en el funcionamiento del liquen.

En nuestras investigaciones hemos observado que *Plectocarpon* ejerce un efecto negativo sobre el liquen, lo que indica un comportamiento parásito. En los experimentos que hemos llevado a cabo, los líquenes infectados por *Plectocarpon* crecen menos y son atacados con más frecuencia por los herbívoros. En la mayoría de los organismos, crecer a buen ritmo es importante para la supervivencia, pues numerosas funciones esenciales, como la reproducción, la acumulación de sustancias de defensa o la capacidad competitiva dependen del tamaño que alcanzan.

De algún modo que aún desconocemos, *Plectocarpon* interfiere en el metabolismo del liquen, quizá robándole importantes recursos, como el carbono, que suelen ir destinados al crecimiento. Al entorpecer el desarrollo del liquen, *Plectocarpon* dificulta su capacidad competitiva frente a otros líquenes y organismos que colonizan el tronco. A la vez, aumenta la vulnerabilidad del liquen a la herbivoría al mejorar su calidad nutricional y volverse más apetitoso para los caracoles y las babosas.

A pesar de estos avances, todavía estamos lejos de comprender los mecanismos que subyacen en estas fascinantes interacciones. También desconocemos las relaciones que pueden establecerse entre otros hongos liquenícolas con otros líquenes. Pero en el caso de la interacción entre *Plectocarpon* y *Lobaria*, todo hace pensar que tres son multitud.

—Sonia Merinero Mesa
Dpto. de Ecología, Botánica y Medioambiente
Universidad de Estocolmo

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección.
Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**



SONIA MERINERO (a y d), GILFERNANDO GIMÉNEZ (b y c)

b

EL TRONCO DE ESTE ROBLE **a** está colonizado por numerosos líquenes, entre ellos *Lobaria scrobiculata*, con cuerpo foliáceo gris oscuro **b**. Se observan en él pequeñas protuberancias de color marrón anaranjado, correspondientes a las agallas del hongo *Plectocarpon scrobiculatae* **c**. Su examen microscópico revela los ascocarpos, unas estructuras con forma de pequeños sacos que contienen las esporas del hongo **d**.

c

d

20 μm

Ascocarpo

Espora

por Antonio Sánchez



Antonio Sánchez es profesor de historia de la ciencia en la Universidad Autónoma de Madrid.

Artesanos, técnicos y prácticos

Los otros protagonistas de la cosmografía ibérica moderna

El mundo de la ciencia ha contraído importantes deudas históricas con las culturas artesanales y el conocimiento práctico. Sin embargo, este vínculo no siempre ha sido reconocido. En general, ha sido considerado desde el punto de vista de antiguas dicotomías como la que distingue entre artes liberales y artes mecánicas, trabajo mental y trabajo manual, o, en definitiva, artesanos y eruditos. Estas divisiones no han hecho sino crear escisiones que dificultan nuestra comprensión de la ciencia.

Hallamos una manifestación clara de ese problema en la ciencia moderna, un tipo de saber que todos identificamos con la emergencia de una nueva filosofía natural y con la Revolución Científica, como si «nuevos», «modernos» y «revolucionarios» fueran únicamente aquellos astrónomos, matemáticos y filósofos geniales que leyeron e interpretaron la naturaleza provistos con nuevos instrumentos y un nuevo método, el método experimental.

Por poner solo un ejemplo, todavía hay quien piensa que la primera circunnavegación al globo de Magallanes y Elcano —aprovechando que se celebra este año su quinto centenario— pertenece al ámbito de la técnica y no al de la ciencia, como si descubrir las montañas de la Luna hubiese sido un hallazgo mucho más sofisticado y revelador que navegar durante meses observando el cielo. Unos eran eruditos; otros, artesanos. Ambos, modernos.

Pero ese método moderno no era nuevo y mucho menos revolucionario. Lo que era nuevo era el contexto, marcado por la Europa de los imperios, por su obsesión expansionista, por la época global que transcurre entre 1400 y 1800. La llamada Revolución Científica fue una consecuencia de una época genuinamente convulsa, cambiante y transformadora que afectó a todos los ámbitos de la vida humana. Esta época modificó nuestra forma de ver el mundo y de hacer ciencia. Y en esa nueva ciencia, producida en un contexto extraordinario, intervinieron no solo los célebres padres de la modernidad (Galileo, Descartes y Newton), sino también muchos otros individuos y colectivos (artesanos, indígenas, navegantes, soldados, misioneros, curanderos y un largo etcétera).



Regimiẽto de navegaciõ
Contiene las cosas que los pilotos hã de saber para bien nauegar: y los remedios y auisos que han de tener para los peligros que nauegando les pueden suceder.
Dirigido a la Real Magestad del Rey don Philipe nuestro Señor.
Por el Maestro Pedro de medina vezino de Seuilla.

REGIMIENTO NÁUTICO de Pedro de Medina (1563).

BIBLIOTECA DIGITAL HISPÁNICA/BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA

Eran modernos y revolucionarios no solo instrumentos como el telescopio y el microscopio, sino también el astrolabio náutico, el cuadrante, las cartas náuticas de latitudes o los atlas, entre muchos otros. Y los espacios del saber no se reducían solo a cortes, academias, universidades u observatorios, sino que también incluían talleres, arsenales, astilleros, minas y barcos.

De la misma forma, la Revolución Científica no afectó solo a la astronomía, las matemáticas y la filosofía natural, sino también a otras muchas prácticas tales como la navegación, la cosmografía, la cartografía, la construcción naval, la alquimia, la farmacopea, la historia natural o la etnología. Además, la ciencia moderna abarcó espacios geográficos que van mucho más allá de Inglaterra, Francia, los Países Bajos, Centroeuropa y el Gran Ducado de Toscana. Es precisamente esta heterogeneidad, esta globalidad y la interacción entre todos estos factores lo que caracterizó a la nueva ciencia.

El mundo ibérico y el Atlántico

En el caso de Portugal y España, esa nueva ciencia europea de carácter global se manifestó de una forma eminentemente empírica vinculada a sus imperios coloniales y a sus extensas redes de información. Conviene recordar que ambas nociones, la de imperio y la de *empiria*, eran europeas antes que ibéricas y representan dos formas típicamente europeas de control y dominio sobre la naturaleza, como apunta Arndt Brendecke, historiador de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich.

En ese contexto, el saber cosmográfico ocupó un papel central, un saber utilitarista basado en la experiencia y la aplicación del conocimiento matemático a los desafíos marítimos. El mundo atlántico estableció nuevas prácticas en el ámbito de la cosmografía europea. A nivel metodológico, los pilotos, cosmógrafos y naturalistas adoptaron la experiencia como único criterio válido para la obtención de nuevo conocimiento sobre nuevas realidades. Este fenómeno dio inicio a nuevos escenarios epistemológicos protagonizados por nuevos agentes, y puso en marcha una serie de medidas sufragadas y controladas por las administraciones imperiales. El conocimiento por experiencia supuso un levantamiento a gran escala de información que generó una cultura visual y material de la ciencia en lengua vernácula. El valor estratégico de este conocimiento impulsó la creación de insti-

tuciones técnicas para el tratamiento de la información, de centros de enseñanza sobre cosmografía y cultura marítima, de nuevas prácticas y oficios, y de artefactos altamente estandarizados.

La experiencia y los antiguos

La experiencia fue un criterio generalizado que afectó a todos los mecanismos de adquisición de saber promovidos por los imperios expansionistas, una forma de operar sistemática, regulada, normalizada y colectiva. Fue la experiencia la que estableció los límites e, incluso, los errores e incongruencias sobre la naturaleza transmitidos por los autores antiguos. La experiencia demostró que nadie se quemaba cuando, dirigiéndose hacia el hemisferio sur, superaba la línea equinoccial. Este tipo de contrastaciones generó desconfianza en los textos clásicos y exaltó los ánimos de quienes veían cómo los logros de la antigüedad eran paulatinamente superados.

El nuevo conocimiento procedía de observaciones a ojo desnudo, de cálculos estimados y de vivencias personales, lo que reabría una vieja herida en torno a la autoridad y la jerarquía del conocimiento antes del siglo XVII. Las fuentes de credibilidad del saber y sus interlocutores eran ahora pilotos, cartógrafos, exploradores y comerciantes, muchos de ellos iletrados. El saber, por tanto, no solo cambió de método, sino también de manos. Los nuevos agentes fueron reconocidos, obteniendo a cambio credibilidad personal y respeto social.

Nuevos espacios, prácticas y oficios

Ese universo empírico de las exploraciones y la compleja red de información que se fue tejiendo a su alrededor obligaron a tomar medidas que permitiesen regular y controlar la experiencia. Una de las primeras fue la creación de instituciones destinadas a administrar nueva información, nuevos espacios para la ciencia. En Lisboa se crearon los Armazéns da Guiné e Índia durante la segunda mitad del siglo XV. En Sevilla se instauró la Casa de la Contratación en 1503. En 1555 hacía lo propio la Muscovy Company en Londres y en 1602 la Dutch East India Company en Amsterdam.

Todas ellas fueron centros de acumulación y de enseñanza destinados a controlar la extensa y compleja red de rutas marítimas de sus respectivos imperios. Y lo hicieron a través de la gestión de información geográfica, de la formación y supervisión técnico-científica de navegantes y cartógrafos, de la creación y regularización de nuevos saberes y de la construcción de instrumentos más precisos.

La institucionalización de la experiencia, su compleja y heterogénea estructura burocrática y la gestión de la numerosa información que llegaba a la península ibérica dio lugar a nuevas prácticas y nuevos oficios. Entre ellos se encontraban cosmógrafos y navegantes. Ello introdujo una novedad importante en el seno del sistema administrativo de las monarquías ibéricas, pues rellenaba un hueco entre dos sectores socialmente separados pero que se necesitaban: el del humanismo universitario (astrónomos y cosmógrafos teóricos) y el de las nuevas comunidades de artesanos (cartógrafos y gente de mar). El Piloto Mayor de Sevilla o el Cosmógrafo-Mor de Lisboa, sin ir más lejos, eran individuos con formación teórica, pero al mismo tiempo hombres prácticos con experiencia en navegación, que interactuaban diariamente con pilotos y cartógrafos.

La cultura material

El nuevo contexto institucional produjo también sus propios artefactos y mecanismos de control, estableciéndose una serie de modelos. Uno de ellos fue un modelo cartográfico construido y conservado en la Casa de la Contratación a partir de 1508: el Padrón Real y General de las Indias. En un primer momento, el Padrón Real fue ideado como un mapa en forma de planisferio náutico que debía representar todo el mundo conocido, y realizado conforme a los datos que los navegantes traían de sus viajes de exploración. En él debían quedar visibles las tierras e islas pertenecientes a la Corona de Castilla, especialmente las nuevas líneas de costa identificadas a través de latitudes y rumbos magnéticos. Al propio tiempo, debía servir como único modelo para elaborar todas las cartas náuticas parciales construidas en Sevilla, y que eran utilizadas por los pilotos de Indias.

Al igual que las *cartas padrões* d'el-Rei depositadas en los Armazéns de Lisboa, el Padrón y sus copias fueron, en definitiva, un intento moderno por controlar un nuevo orden geográfico. Estandarizar la práctica de la cosmografía y sus artefactos permitía detectar errores e inconsistencias, hacer correcciones con información contrastada, y, sobre todo, crear una única imagen, la imagen oficial del mundo.

La literatura y la lengua

Otra de las particularidades de la cosmografía ibérica de la edad moderna fue la producción de una extensa bibliografía técnica especializada en forma de compendios de geografía, regimientos y almanaques, guías e itinerarios náuticos, derroteros, diarios de viajes y tratados sobre la esfera. Esta bibliografía fue realizada en un ambiente práctico, que condicionó su uso y definió sus principales características. Fue transmitida en lengua vernácula, ya que estaba destinada a explicar problemas técnicos concretos a individuos con poca formación y escasos recursos económicos.

Todas las obras fueron escritas en un estilo híbrido que alternaba principios teóricos básicos de astronomía y matemáticas con la resolución de problemas prácticos de navegación. La organización de los contenidos se asemeja a los libros de reglas propios de otras disciplinas artesanales como la arquitectura o la agricultura: manuales con un estilo expositivo sistemático, secuencial, claro y directo. Además, algunos de ellos serían rápidamente traducidos a otras lenguas europeas.

El mundo moderno supuso, pues, una revolución empírica en la esfera científica. No cambió solo el mapa del mundo y los instrumentos y métodos para observarlo y medirlo, sino también la procedencia y el número de sus artífices, que nada tenían que ver con individuos singulares. Las nuevas comunidades de practicantes surgidas de un proceso histórico de transformación global contribuyeron también a construir la nueva ciencia moderna. IyC

PARA SABER MÁS

Experiencing nature: The Spanish American Empire and the Early Scientific Revolution. Antonio Barrera Osorio. University of Texas Press: Austin, 2006.

Artisan/practitioners and the rise of the new sciences, 1400–1600. Pamela O. Long. Oregon State University Press: Corvallis, 2011.

Imperio e información. Funciones del saber en el dominio colonial español. Arndt Brendecke. Iberoamericana Vervuert: Madrid, 2012.

Ciencia secreta. La cosmografía española y el Nuevo Mundo. Maria M. Portuondo. Iberoamericana Vervuert: Madrid, 2013.

The structures of practical knowledge. Recopilación dirigida por Matteo Valleriani. Springer: Dordrecht, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Conocimiento científico e inteligencia corporal. H. Otto Sibum en *IyC*, febrero de 2017.

por Rosaura Farré

Rosaura Farré es catedrática jubilada de nutrición y bromatología de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Valencia y miembro del comité de expertos de la Cátedra Carne y Salud, de la Universidad de Barcelona. Ha investigado las modificaciones que experimentan los alimentos como consecuencia de su manipulación.



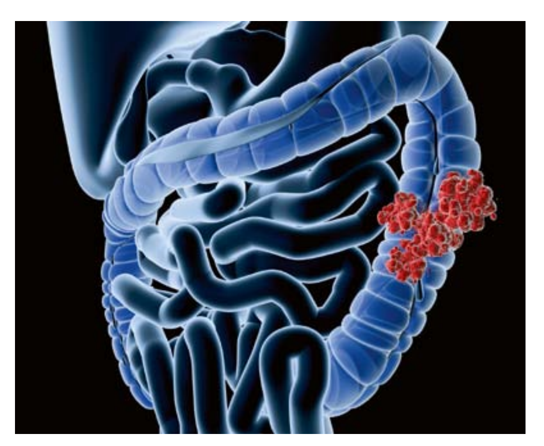
Consumo de carne y cáncer

¿Hasta qué punto las carnes rojas y las procesadas causan tumores colorrectales?

El cáncer colorrectal es el más habitual de todos los tumores en España; alcanza una frecuencia del 15 por ciento, según la Sociedad Española de Oncología Médica. Sin embargo, no resulta el más letal: su tasa de mortalidad, del 14 por ciento, es inferior a la del cáncer de pulmón, del 20 por ciento. El Fondo Mundial para la Investigación del Cáncer y el Instituto Americano para la Investigación del Cáncer concluían, en 2007, que la ingesta de carne roja o procesada representaba una causa convincente de cáncer colorrectal, por lo que recomendaban limitar su consumo. Desde entonces, la ingesta de este alimento ha sido objeto de debate y publicidad negativa.

La mayor incidencia de este tumor en los últimos años se ha asociado a la dieta occidental, que da preferencia a la carne roja y las grasas saturadas por encima de las frutas y las verduras. Estas últimas constituyen una fuente de fibra, un factor de protección frente al desarrollo del cáncer. No obstante, algunos elementos de confusión pueden enmascarar esta asociación, ya que quienes consumen gran cantidad de carne roja o procesada (salchichas, embutidos...) y pocos vegetales suelen tomar mucho azúcar, beber más alcohol y llevar una vida más sedentaria. En consecuencia, para entender esta relación es necesario evaluar la globalidad de la dieta y el estilo de vida. De hecho, estimaciones realizadas en EE.UU. sugieren que la mitad de los casos de cáncer colorrectal podrían evitarse mejorando la dieta y aumentando la actividad física.

Se han propuesto varios mecanismos para explicar el efecto perjudicial de la carne. Uno de ellos es la formación de nitrosaminas. Estas se generan, en las condiciones de acidez del estómago, por la reacción entre los nitratos y nitritos añadidos a los productos cárnicos (para mejorar su conservación y prevenir el botulismo) con las aminas secundarias, abundantes en dichos productos. De este modo, en 2010, el comité de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer concluyó que los nitratos y los nitritos son sustancias probablemente carcinógenas. La percepción negativa de estos compuestos ha llevado a reformular la curación de los productos cárnicos, mediante la reducción de su contenido y la adición de ascorbato y eritorbato, que actúan como inhibidores de la nitrosación y aceleran la curación. No obstante, algunos vegetales (puerro, rábano, remolacha o espinacas) presentan un gran contenido en nitratos, que pueden ser metabolizados y convertidos en nitritos por los microorganismos de la cavidad bucal. Así, el riesgo de cáncer asociado a la carne [por los nitratos y nitritos que contiene] es relativamente bajo si se compara con el de ciertos vegetales. Por otro lado, el hierro de los productos cárnicos, que es un nutriente esencial, también favorece la formación de compuestos nitrosos (y, además, puede promover por sí solo la carcinogénesis).



Otro mecanismo que podría favorecer el cáncer colorrectal es la alteración de la comunidad bacteriana del tracto intestinal inferior. Esta suele actuar como mediadora en la relación entre los alimentos y el intestino, y ejerce un efecto protector frente al desarrollo de un tumor. Su modificación a causa de las grasas presentes en la carne roja podría relacionarse con una mayor incidencia del cáncer colorrectal.

La obesidad y el sobrepeso constituyen otro factor de riesgo. Ambos implican serios problemas para la salud, entre ellos la diabetes y el infarto de miocardio, patologías que exhiben una fuerte relación causal con diferentes tipos de cáncer, entre ellos el colorrectal.

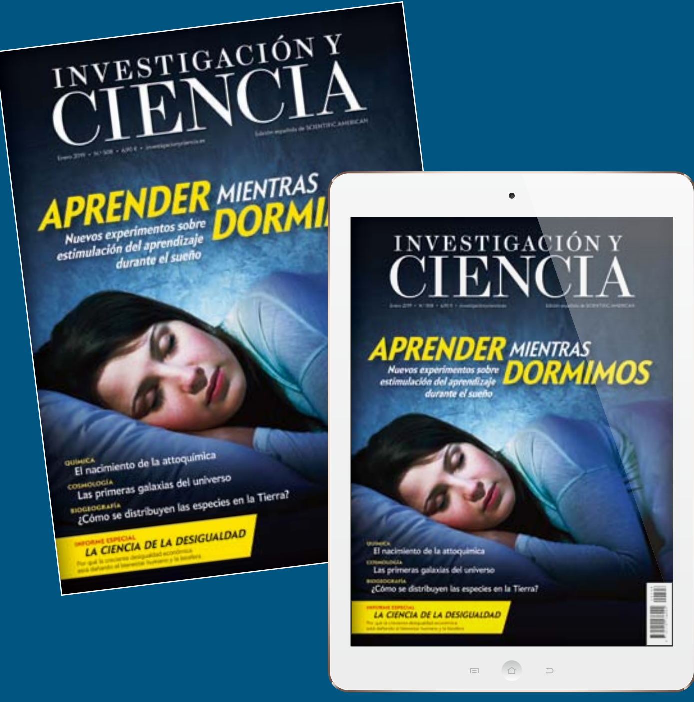
Un último factor es la formación de compuestos cancerígenos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (entre ellos el benzopireno) y las aminas heterocíclicas, cuando las carnes se someten a altas temperaturas (asado, barbacoa), un daño que, obviamente, no es atribuible al alimento en sí mismo.

Pero, a pesar de los efectos perjudiciales de su consumo excesivo, la carne roja constituye una fuente de nutrientes beneficiosos. Contiene proteínas, vitamina B_{12}, hierro y zinc, sustancias necesarias para el organismo y que suelen ser deficitarias en la alimentación. No obstante, el exceso de estas puede desequilibrar la dieta, con el resultado de una deficiencia en otros nutrientes y compuestos bioactivos que ejercen una función protectora al contrarrestar los efectos citotóxicos y mutagénicos de una dieta muy rica en carne.

En resumen, las dietas desequilibradas, el sedentarismo y determinadas formas de cocinado pueden ser factores de confusión cuando se establece, sin los debidos matices, una relación entre la tendencia al aumento del cáncer colorrectal y el consumo de carne roja. Parece prudente, pues, recomendar una alimentación variada, rica en frutas y verduras, que incluya una cantidad moderada de carnes (un máximo de 70 gramos diarios), preferiblemente magras (que pueden incorporar cierta proporción de carnes rojas) y, en menor medida, procesadas. IyC

© RAYCAT/ISTOCKPHOTO

SUSCRÍBETE A INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
  ~~82,80 €~~ 75 €
  por un año (12 ejemplares)
  ~~165,60 €~~ 140 €
  por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Y además elige 2 números de la colección TEMAS gratis





www.investigacionyciencia.es/suscripciones
Teléfono: +34 934 143 344

GENÉTICA

LA TEORÍA NEUTRALISTA DE LA EVOLUCIÓN MOLECULAR, MEDIO SIGLO DESPUÉS

Sigue vigente la teoría que explica con elegancia la gran variación genética que existe en la naturaleza. No obstante, debe ampliarse para incorporar los nuevos conocimientos sobre el funcionamiento del genoma

Antonio Barbadilla, Sònia Casillas y Alfredo Ruiz

LA EVOLUCIÓN DEL GENOMA, según la teoría neutralista desarrollada por Motoo Kimura (*delante*) y Tomoko Ohta (*detrás*), se produce por la aparición mayoritaria de mutaciones neutras (*hojas*), sobre las que no opera la selección natural, y unas pocas mutaciones ventajosas (*frutos*), que se fijan enseguida. De la teoría se deriva una ecuación mínima (*arriba*) y la idea del reloj molecular, sobre el que se despliega toda la historia de la vida en la Tierra.

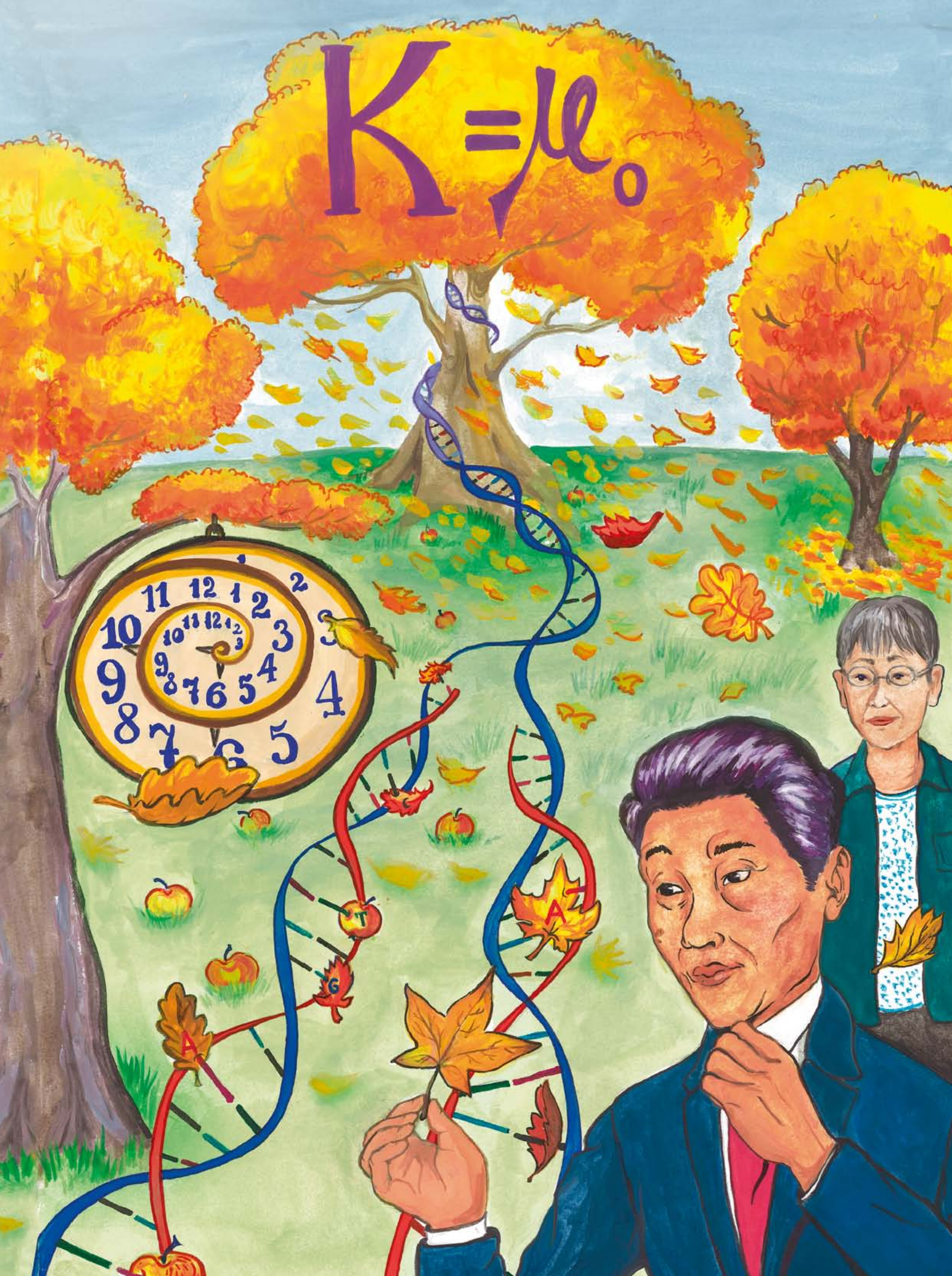
EN SÍNTESIS

La teoría neutralista, planteada por Motoo Kimura en 1968, propone que gran parte de la variación genética observada en las poblaciones se debe a la fluctuación aleatoria de variantes genéticas que son neutras, sobre las que apenas actúa la selección natural.

La simplicidad, la robustez y la capacidad de predicción de la teoría la convierten en un marco conceptual imprescindible para comprender el transcurso de la evolución en el nivel molecular.

La propuesta de Kimura chocó contra las teorías seleccionistas prevalecientes, las cuales otorgaban un papel principal a la selección natural. Se inició así un largo debate entre ambas corrientes que se ha prolongado hasta nuestros días.




K = μo

Antonio Barbadilla es profesor del Departamento de Genética y Microbiología y del Instituto de Biotecnología y Biomedicina, de la Universidad Autónoma de Barcelona. Dirige el grupo Bioinformática de la Diversidad Genómica, centrado en el análisis e interpretación de la variación genética a escala genómica.

Sònia Casillas, profesora del departamento e instituto arriba mencionados, investiga la variación genómica humana. Busca pruebas de la adaptación genética mediante la integración de capas de variación multiómica.

Alfredo Ruiz es catedrático de genética del departamento arriba mencionado. Dirige el grupo Genómica, Bioinformática y Biología Evolutiva y su investigación se centra en las causas y consecuencias de las reordenaciones cromosómicas.



En 1968, el genetista japonés Motoo Kimura publicó en *Nature* un artículo en el que presentaba una teoría mínima y revolucionaria, la teoría neutralista de la evolución molecular, para explicar los cambios que se producen en el genoma a lo largo del tiempo y que, en última instancia, dan lugar a la evolución de las especies.

En su teoría, Kimura planteaba que gran parte de la variación genética observada en las poblaciones y entre las especies se debe a la fluctuación y la fijación aleatoria en el genoma de variantes genéticas neutras. Que una variante sea neutra no significa que carezca de función biológica, sino que resulta equivalente a otras frente a la selección natural. Según Kimura, cuando dos o más variantes son neutras, son igualmente efectivas para la supervivencia y la reproducción del individuo. La aparición, por mutación, de una variante neutra es indetectable para la selección y solo el azar determinará su pervivencia o extinción.

La teoría neutralista chocó frontalmente con la visión seleccionista extrema, o panseleccionista, que predominaba en ese momento. Esta se derivaba de la teoría de Darwin y defendía la omnipresencia de la selección natural; esto es, que el destino de toda variante genética, incluso cada cambio de un simple nucleótido del genoma, lo dicta únicamente la selección natural. Kimura, en cambio, otorgaba un papel menor a la selección natural en la explicación de la variación genética. La oposición de los seleccionistas fue inmediata, iniciándose la controversia neutralista-seleccionista que ha acompañado a la genética evolutiva durante décadas hasta nuestros días.

Cabe destacar que el ámbito de la teoría neutralista es la variación molecular. Kimura creía que la selección natural ejerce un papel fundamental en la adaptación del fenotipo de los organismos a su ambiente, pero no influye en la mayoría de las variantes detectadas en el nivel molecular. En este sentido, la evolución molecular sobre la que se centra su teoría integra los conocimientos de la evolución darwiniana y de la genética. La primera explica que las especies que hoy pueblan la Tierra se derivan, a través de un proceso continuo de descendencia con modificación, de otras especies que existieron en el pasado. La genética, por su parte, nos enseña que hay un componente fundamental que transmite cada organismo a su descendencia generación tras generación: la molécula de ADN (o ARN en algunos virus), depositaria de la herencia genética. A partir de estas dos ideas, la evolución biológica puede concebirse como un simple algoritmo de evolución molecular: la conversión de la variación genética entre individuos, generada por mutación en el ADN, en variación genética entre poblaciones y especies a lo largo del tiempo.

Kimura planteó su teoría tras casi dos décadas de haberse dedicado de manera concienzuda a modelizar matemáticamente la variación genética que se observaba en el seno de las especies. Había sido pionero en aplicar las ecuaciones del fenómeno físico de la difusión al estudio de la dinámica de la variación genética en las poblaciones. Según él, el comportamiento de las variantes genéticas, dependiente del muestreo aleatorio de los gametos en cada generación y del efecto de fuerzas deterministas (como la selección, la mutación y la migración), podía aproximarse al proceso de difusión molecular de un fluido. Pero, debido a los insuficientes datos empíricos con los que contrastar dichos modelos, toda esa exploración teórica exhaustiva no era más que un puro ejercicio formal, sin conexión con el mundo real.

A mediados de la década de los 60 se obtuvieron las primeras estimaciones de variación genética en las poblaciones naturales gracias al empleo de la técnica de la electroforesis en gel. Asimismo, se cuantificaron las diferencias genéticas entre especies mediante la secuenciación de proteínas tales como la hemoglobina. Estos primeros datos moleculares pusieron de manifiesto una inesperada cantidad de variación genética y llevaron a Kimura, equipado con su sofisticado bagaje genético-matemático, a proponer una teoría alternativa radical a las teorías seleccionistas previas.

En 1983, reunió las distintas aportaciones de la teoría neutralista (las suyas, las de su estrecha colaboradora de por vida,

PÁGINAS ANTERIORES: OLGA DOLGOVA

Tomoko Ohta, y las de otros autores) en la obra *The neutral theory of molecular evolution*. Considerado hoy un clásico, la lectura del libro cautiva por su elegancia conceptual, la claridad y fuerza de sus argumentos y la enorme capacidad de explicar los nuevos datos moleculares. El libro contribuyó de modo decisivo a que el neutralismo se estableciera como el paradigma de la evolución molecular. Podemos afirmar que la genética evolutiva molecular sería hoy incomprensible sin el marco conceptual que establece el neutralismo, a partir del cual se puede dialogar y avanzar firmemente en esta ciencia.

¿Cuáles son las claves del éxito de la teoría neutralista? Al menos pueden listarse seis características distintivas que la hacen paradigmática: la simplicidad, la inteligibilidad, la robustez, la capacidad de hacer predicciones contrastables, la relevancia que otorga al azar en la evolución y el papel que desempeña la variación neutra como facilitadora de la adaptación. A continuación, explicaremos estas características para finalmente abordar los retos actuales de la teoría neutralista. Con este artículo pretendemos ofrecer un modesto homenaje a Kimura y a su elegante teoría tras cumplirse el medio siglo de su formulación.

SIMPLICIDAD

La variación genética procede, en última instancia, de las mutaciones, los cambios del material genético que un individuo presenta y transmite a su descendencia. El efecto de una mutación sobre la supervivencia y la reproducción de un individuo (su eficacia biológica) puede ser desde letal (muy deletérea) hasta muy favorable (adaptativa), pasando por ser neutra. La teoría neutralista reduce este espectro de mutaciones a dos categorías principales: las muy deletéreas y las neutras (las ventajosas son muy escasas). Las primeras desaparecen de inmediato de la población y no contribuyen a la variación genética. El destino de las segundas, en cambio, dependerá del azar. Su frecuencia fluctúa aleatoriamente: aumenta o disminuye de modo fortuito a lo largo del tiempo y da lugar al polimorfismo.

La explicación biológica de la fluctuación aleatoria de las variantes neutras es que los gametos que forman los individuos de cada generación son una muestra al azar del gran número de gametos masculinos y femeninos producidos en la generación precedente. Este paseo aleatorio se denomina deriva genética; en su transcurso, una mayoría de las variantes acabarán perdiéndose, pero la minoría restante llegará finalmente a fijarse, esto es, alcanzará una frecuencia del cien por ciento en la población. La fijación de las variantes neutras generadas por mutación a lo largo de millones de generaciones causa la evolución del genoma de las especies. Como en todo muestreo aleatorio, la magnitud de la fluctuación dependerá del tamaño, o censo, de la población: cuanto menor sea este, mayor será la fluctuación provocada por la deriva.

Bajo el supuesto de la teoría neutralista, puede deducirse una de las expresiones matemáticas más elegantes de la ciencia:

$$K = \mu_0$$

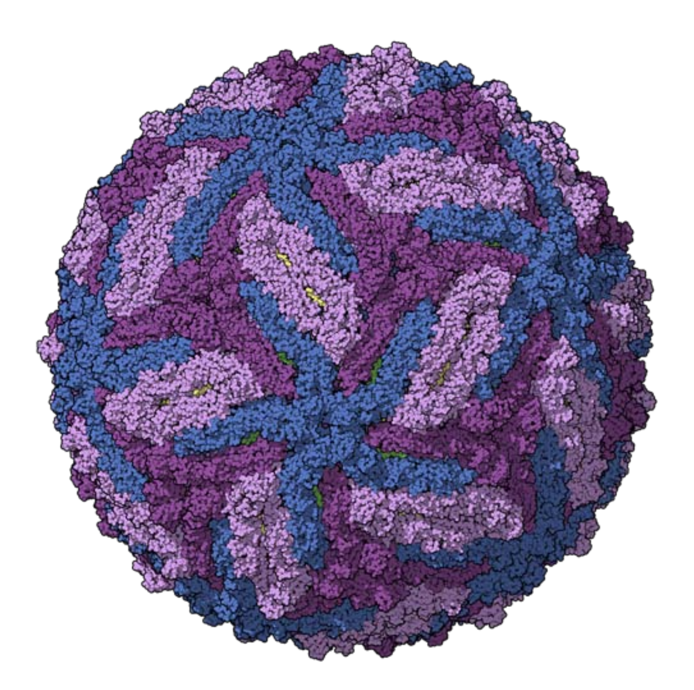
La fórmula establece que la tasa de evolución molecular por generación (K, también denominada tasa de fijación o sustitución) es igual a la tasa (o frecuencia) de las mutaciones neutras por generación (μ_0). El parámetro K representa la velocidad con la que evoluciona, o acumula diferencias, el genoma (o una secuencia de ADN) de una especie. Si las variantes son neutras, la tasa de evolución depende únicamente de la tasa de aparición de nuevas de mutaciones por generación.

De la expresión $K = \mu_0$ se infiere que la acumulación de las diferencias genéticas fijadas entre especies (que originan la divergencia) incrementa linealmente con el tiempo a lo largo de las generaciones. Esta consecuencia de la teoría neutralista constituye el fundamento teórico de la hipótesis del reloj molecular, formulada algunos años antes por Emile Zuckerkandl y Linus Pauling, la cual permite estimar el tiempo de separación de dos especies a partir del número de diferencias fijadas entre sus secuencias proteicas. Es una de las herramientas más poderosas para construir los árboles evolutivos y los tiempos de bifurcación de especies a partir del análisis de secuencias moleculares. Una de sus aplicaciones recientes ha sido el seguimiento de la evolución de la epidemia del virus del zika. La comparación de los genomas del virus extraído de numerosas personas infectadas en distintas fechas y localizaciones muestra la acumulación lineal de las diferencias genéticas a lo largo del tiempo y ha permitido deducir la expansión de la epidemia, datar su origen y estimar la tasa de mutación del virus.

Al comparar la ecuación de la tasa de evolución neutra con otras famosas ecuaciones de la ciencia, como la equivalencia entre masa y energía ($E = mc^2$) en la teoría de la relatividad de Einstein, la fórmula de entropía de Boltzmann ($S = k \log W$), o la segunda ley de la dinámica de Newton ($F = ma$), observamos que tiene la mínima expresión. Es la más simple y, en nuestra opinión, la más elegante de la ciencia.

INTELIGIBILIDAD

La teoría neutralista clarifica el concepto de descendencia con modificación que se halla implícito en la visión darwinista de la evolución. El panseleccionismo dominante antes de la llegada del neutralismo explicaba el polimorfismo (la variación genética intrapoblacional) y la divergencia (la variación entre especies) como dos procesos selectivos independientes.



LOS VIRUS, como el del zika (*imagen*), experimentan una tasa de mutación muy elevada. Acumulan numerosas mutaciones a un ritmo que es lineal respecto al tiempo, según propone la teoría neutralista. La aplicación de esta idea, conocida como reloj molecular, ha permitido llevar a cabo un seguimiento en el espacio y el tiempo de los brotes epidémicos del zika desde que el virus se descubrió en Uganda, en 1947, hasta el brote de 2014 en América.

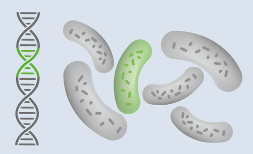
WIKIMEDIA COMMONS/MANUEL ALMAGRO RIVAS/CC BY SA 4.0

FIJACIÓN Y PÉRDIDA DE MUTACIONES NUEVAS

¿Cómo evoluciona el genoma?

La selección natural actúa a favor o en contra de las nuevas variantes genéticas que se generan por mutación, en función de si estas son beneficiosas o perjudiciales, es decir, si suponen un nuevo rasgo que mejora o empeora la supervivencia y reproducción de los mutantes. Las mutaciones neutras generan variantes genéticas equivalentes a las existentes. Al no ofrecer ni ventajas ni inconvenientes para la supervivencia, la selección no actuará sobre ellas. Basándose en estas premisas, la teoría seleccionista y la neutralista plantean modelos distintos sobre el modo en que evoluciona el genoma.

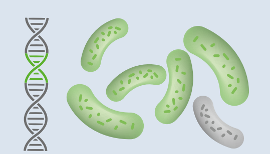
Mutación beneficiosa



La bacteria mutante presenta resistencia a los antibióticos

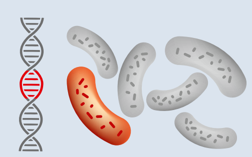
Selección positiva

La selección natural favorece la supervivencia y reproducción de las bacterias mutantes sobre las demás



Las mutantes aumentan su proporción o dominan en las siguientes generaciones

Mutación perjudicial

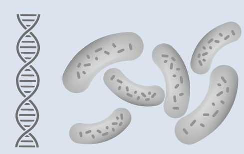


La bacteria mutante sintetiza en menor cantidad una enzima esencial para su metabolismo



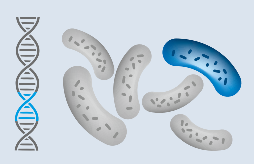
Selección negativa

La selección natural reduce o elimina las bacterias mutantes que sobrevivirán y se reproducirán



Las mutantes disminuyen su proporción o desaparecen en las siguientes generaciones

Mutación neutra

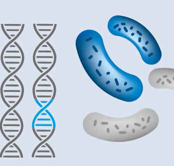


La bacteria mutante presenta una enzima ligeramente distinta (en su composición molecular) pero que desempeña la misma función



Ausencia de selección

La selección natural no actúa ni a favor ni en contra de las bacterias mutantes



El azar por deriva genética hace fluctuar la proporción de las mutantes, que aumentan o disminuyen hasta que la mutación se fija o se elimina.

Por un lado, las diferencias entre especies se atribuían a la selección direccional positiva, esto es, a la selección continuada a favor de una variante hasta que esta se fijaba en la población. Por otro lado, el origen del polimorfismo de las poblaciones se atribuía a la acción equilibradora de la selección, la cual tendía a mantener dos o más variantes estables en el tiempo, bien por la ventaja del heterocigoto (con dos alelos distintos) en relación con los homocigotos respectivos (cada uno con dos alelos iguales), o bien por la selección a favor de variantes raras (selección dependiente de la frecuencia). El famoso evolucionista Theodosius Dobzhansky fue un adalid de la ventaja de los heterocigotos como mecanismo para explicar la presencia de polimorfismos.

Sin embargo, el distinto proceso propuesto para el polimorfismo, mantenido por selección equilibradora, y la fijación de variantes, causada por selección positiva, rompía la lógica darwiniana de la evolución entendida como descendencia con modificación. No había conexión ni continuidad de proceso entre el polimorfismo dentro de la población y la divergencia genética entre poblaciones.

En contraste con esa idea, Kimura y Ohta publicaron en 1971 un artículo donde señalaban que, en la dinámica de la variación neutra, el polimorfismo y la evolución molecular no son fenómenos distintos; en lugar de ello, planteaban que el polimorfismo es simplemente una fase transitoria de la evolución molecular. En la visión neutralista queda claramente establecida la continuidad espaciotemporal del proceso de la evolución molecular, que se inicia con el cambio individual, continúa con el polimorfismo poblacional y finaliza con la divergencia entre especies. El neutralismo explica esta continuidad dinámica de una forma intuitiva como ninguna otra propuesta previa.

Pero la teoría neutralista no solo hace más clara la conexión entre variación entre individuos y variación entre especies. También permite diferenciar las dos principales aportaciones de Darwin y las considera fenómenos independientes: la evolución de la vida como proceso genealógico, de descendencia con modificación; y la selección natural como proceso que produce la asombrosa adaptación de los organismos a su medio. El panseleccionismo, en cambio, al considerar toda variante como selectiva, identificaba erróneamente evolución con selección, pero ninguna de las dos implica la otra.

Esta separación entre genealogía y selección natural inspiró al matemático británico John Kingman a desarrollar la teoría de la coalescencia, una aproximación genealógica para el estudio de la dinámica de la variación genética. La teoría parte del nivel de variación genética observado en una muestra de individuos actuales para inferir los sucesos evolutivos pretéritos. Se ha convertido en una herramienta esencial para analizar e interpretar evolutivamente los patrones de variación nucleotídica obtenidos a partir de la secuenciación de genomas, y puede considerarse una hija intelectual del pensamiento neutralista.

Dos modelos para explicar la evolución molecular

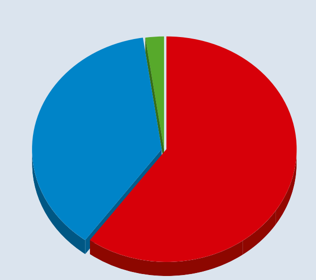


Las teorías seleccionistas, predominantes durante la primera mitad del siglo xx, atribuyen las diferencias genéticas entre poblaciones y especies únicamente a la selección natural. Esta se encarga de fijar las mutaciones beneficiosas y de eliminar las perjudiciales. Ambas constituyen la mayor proporción de todas las mutaciones que aparecen.

Mutaciones perjudiciales

Mutaciones beneficiosas

Mutaciones neutras



La teoría neutralista planteada por Kimura en 1968 confiere, en cambio, un gran peso a las mutaciones neutras. Estas cambiarán su frecuencia como consecuencia de la deriva genética, y terminarán por fijarse o perderse de forma aleatoria.

ROBUSTEZ AMPLIADA

La teoría neutralista es robusta porque logra explicar un conjunto amplio de datos. Sin embargo, la hipótesis inicial de Kimura es muy estricta. Si las mutaciones son neutras o muy deletéreas, el valor del coeficiente de selección (la intensidad relativa de la selección contra ellas), *s*, es 0 o menos infinito ($-\infty$), respectivamente. Esta rigidez limita su aplicación para todas aquellas mutaciones que no caen entre estas dos categorías. En 1973, Ohta propuso la teoría casi neutralista, una extensión de la teoría de Kimura todavía más robusta, en la que relajaba los supuestos de la formulación original al permitir que las mutaciones pudieran también ser ligeramente deletéreas.

El modelo casi neutralista llega a una sorprendente conclusión: la probabilidad de fijación de una mutación no depende solo del efecto que esta tiene sobre la eficacia biológica del individuo portador, sino también del censo de la población. El producto de ambos parámetros (el censo de la población, *N*, y el coeficiente de selección, *s*) representa un índice de selección poblacional, *Ns*, que predice la relación de fuerzas entre la deriva y la selección. Ohta demostró que, excepto en poblaciones de censo muy grande en relación con el coeficiente de selección, las mutaciones ligeramente deletéreas se comportan como si fueran efectivamente neutras. Es decir, pueden llegar a fijarse en la población si el producto del censo efectivo de la población por el coeficiente de selección cae en el intervalo de valores en el que la deriva domina sobre la selección.

Considerando que muchas de las mutaciones suelen ser neutras o ligeramente deletéreas, la teoría casi neutralista aumenta espectacularmente el espectro de mutaciones que pueden interpretarse dentro del paradigma neutralista. La teoría casi neutralista también permitió explicar algunas observaciones que parecían desviarse de la hipótesis estrictamente neutra, como la correlación lineal entre la divergencia evolutiva y el tiempo absoluto en años (y no en generaciones, como predice el reloj molecular). La robustez que aportó la teoría casi neutralista amplió enormemente la capacidad explicativa y predictiva del neutralismo, muy por encima de cualquier otra hipótesis alternativa.

PREDICCIONES CONTRASTABLES

La simplicidad de la teoría neutralista permite hacer predicciones cuantitativas de los niveles de polimorfismo y divergencia genéticos que se esperan, los cuales pueden ser contrastados estadísticamente con datos de variación reales.

Una de las predicciones más generales y ampliamente aceptadas del neutralismo es que el grado de constreñimiento funcional (una medida del impacto de la selección negativa sobre las nuevas mutaciones) en una región del genoma determina su nivel de polimorfismo y divergencia. Este principio explica, por ejemplo, que las fijaciones no sinónimas de la secuencia de un gen que codifica una proteína sean menos frecuentes que las fijaciones sinónimas que no la afectan, pues un cambio de la secuencia de la proteína tiene una mayor probabilidad de ser deletéreo y, por tanto, una mayor posibilidad de ser eliminado por la selección natural que uno sinónimo. De hecho, la aplicación del principio neutralista «a mayor conservación de la secuencia, mayor constreñimiento funcional» es una de las estrategias más fructíferas en la búsqueda actual de regiones funcionales en el genoma. Si se comparan los genomas de dos especies, aquellas regiones más conservadas son candidatas a codificar funciones biológicas relevantes.

La capacidad de la teoría neutralista de hacer predicciones de los niveles de polimorfismo y divergencia a partir de valores definidos ($s = 0$, en el caso del neutralismo estricto) le ha permitido desempeñar el papel de hipótesis nula universal. Un rechazo estadístico de un modelo nulo neutro se puede considerar como prueba de procesos no neutros, entre ellos la selección natural. Una gran parte de la investigación presente en genética de poblaciones molecular se centra en elaborar pruebas de neutralidad a partir de la observación de las huellas características que deja la selección natural en el patrón de variación de las regiones o variantes seleccionadas para así descubrir qué partes del genoma están sometidas a selección.

Más recientemente, la hipótesis neutralista ha ampliado su campo de aplicación más allá de la evolución molecular, abarcando, entre otros, el estudio de procesos de crecimiento y proliferación celular, como el cáncer, o de fenómenos socioculturales que surgen en la evolución humana.

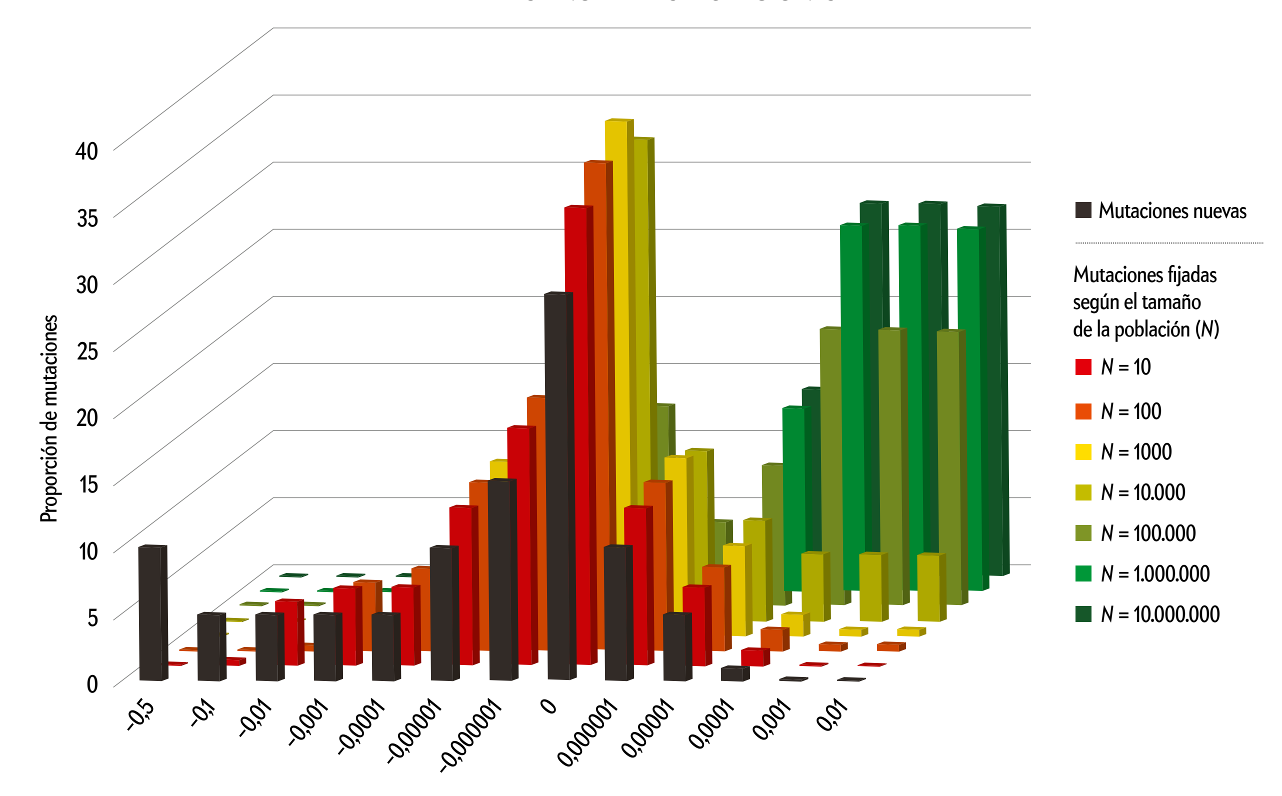
EL PAPEL DEL AZAR

La moderna síntesis evolutiva de los años 40 y 50, también denominada neodarwinismo, reúne las aportaciones de los estudios genéticos experimentales, la teoría de la genética de poblaciones, estudios de poblaciones naturales, de sistemática, paleontológicos y ecológicos. Concluye que la evolución es el resultado de la interacción de dos fuerzas principales de distinta naturaleza: la mutación, que genera nueva variación genética y fenotípica, y la selección natural. En su famoso ensayo de 1970

El peso de la selección y la deriva

Los genomas evolucionan bajo la acción de la selección natural y la deriva genética. Cada nueva mutación que aparece en la población tiene un coeficiente de selección que viene determinado por su efecto sobre la eficacia biológica del organismo portador. La teoría neutralista simplifica este espectro de mutaciones a dos categorías: las muy deletéreas y las neutras (las ventajosas son muy escasas). La teoría casi neutralista plantea una situación más realista al considerar que las mutaciones pueden ser también ligeramente deletéreas. En este caso, la probabilidad de que se fijen las mutaciones no solo dependerá de su eficacia biológica, sino también del tamaño de la población, como se representa abajo.

EL DESTINO DE LAS MUTACIONES



Supongamos que las mutaciones que surgen en la población (*marrón*) presentan coeficientes de selección (*s*) que varían entre −0,5 (deletéreas) y 0,01 (favorables), siendo las mutaciones neutras (*s* = 0) las más frecuentes. Cuando el tamaño de la población (*N*) es pequeño, la fuerza de la selección natural no llega a compensar la de la deriva genética (el azar), y las mutaciones desfavorables pueden fijarse, excepto si son muy deletéreas, en cuyo caso son siempre eliminadas. Las mutaciones favorables tienden a perderse antes de completar su fijación. Si la población es más grande, el efecto de la deriva genética disminuye y la selección natural resulta más eficiente: la proporción de mutaciones ventajosas que se fijan aumenta, mientras que la de las deletéreas y neutras disminuye.

El azar y la necesidad, el bioquímico y premio nóbel Jacques Monod empleaba los dos términos filosóficos del título para referirse a esos dos factores de la evolución. La mutación es un fenómeno intrínsecamente azaroso, en el sentido de que no es lamarckiano, no tiene por objeto la adaptación al medio. La síntesis moderna ve la mutación esencialmente como un factor de exploración aleatoria de las posibilidades combinatorias del mensaje genético. Al elemento exploratorio de la mutación le sigue el proceso de criba de la selección natural: se elige lo necesario para la existencia, aquellas variantes que contribuyen a la eficacia biológica de los organismos. El azar de las mutaciones y la necesidad de la selección constituyen la quintaesencia del neodarwinismo.

En la teoría neutralista, el azar adquiere una mayor relevancia, pues introduce una segunda fuerza aleatoria, además de la mutación. La deriva genética, que conlleva la fijación aleatoria de variantes genéticas neutras o casi neutras en poblaciones finitas, contribuye muy esencialmente a la evolución molecular. No todo es la supervivencia del más apto, como pretende la versión panseleccionista del neodarwinismo, pues tiene cabida también la supervivencia del más afortunado. Como muestra la teoría casi neutralista, el azar gana con frecuencia la partida a la selección, ya que puede fijar en la población variantes neutras e incluso desfavorables. Esta variación latente que es neutra o subóptima puede desempeñar un papel clave en una futura adaptación ante circunstancias cambiantes, como se abordará a continuación.

FACILITADORA DE LA ADAPTACIÓN

La última característica distintiva que queremos destacar de la teoría neutralista es que otorga a la variación neutra la facultad de facilitar la adaptación. Después de décadas de controversia entre las hipótesis neutralista y seleccionista, consideradas antagónicas y en competencia, distintos autores han replanteado por completo la relación entre ambas teorías y proponen una interacción simbiótica entre ellas. Según esta nueva visión, las variantes neutras pueden ser fundamentales para facilitar la selección adaptativa y el origen de la complejidad genómica.

En poblaciones teóricamente infinitas, sin deriva genética, la selección natural resultaría tan eficiente que actuaría de forma tiránica, pues eliminaría cualquier variante que no fuese óptima; no permitiría que los genomas abandonaran su adaptación máxima para investigar nuevos picos y paisajes adaptativos. En contraste, en poblaciones pequeñas donde la selección es ineficiente y permite que el genoma acumule mutaciones neutras o levemente perjudiciales a causa de la deriva genética, estas pueden convertirse más adelante en una fuente de innovaciones adaptativas. Michael Lynch, de la Universidad de Iowa, ha propuesto la atractiva hipótesis de que la complejidad del genoma eucariota se iniciaría mediante procesos no adaptativos debidos a la deriva genética en poblaciones pequeñas, que, a su vez, proporcionaría un nuevo sustrato para construir de manera secundaria nuevas formas más complejas del organismo a través de la acción de la selección natural.

Aunque en un determinado entorno las variantes neutras resulten equivalentes en cuanto a su eficacia biológica, pueden considerarse una fuente potencial de variación adaptativa latente, pues si las circunstancias ambientales varían pueden dejar de ser neutras, con lo que aumentan las posibilidades adaptativas de los organismos. Andreas Wagner, biólogo evolutivo de la Universidad de Zúrich, ha propuesto el concepto de red de genes neutros: esta comprendería el conjunto de posibles combinaciones alélicas adaptativamente equivalentes. Las redes génicas neutras permitirían explorar el espacio genotípico de un modo más exhaustivo del que lo haría la selección natural sin ellas, y de su arquitectura intrínseca se derivarían propiedades tales como la robustez y adaptabilidad de los organismos.

RETOS ACTUALES

Desde su formulación, en 1968, y a lo largo de la década de los ochenta, la teoría neutralista se estableció como paradigma de la evolución molecular. Pero el diluvio de datos de secuencias genéticas en los años noventa y la llegada de la secuenciación de genomas completos en este nuevo siglo han puesto de manifiesto algunas limitaciones de la teoría.

Los nuevos datos han permitido describir la variación nucleotídica a escala genómica y buscar en los patrones de variación pruebas de selección en el genoma de un número creciente de especies con una resolución sin precedentes. Tales estudios han mostrado en algunas especies de censo poblacional grande, como la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*), que la selección natural de variantes genómicas es mucho más abundante de lo que postula la teoría neutralista. Esta selección recurrente impacta de un modo relevante sobre los niveles de variación de las regiones neutras adyacentes, sobre todo si la tasa de recombinación local es baja o nula. Ello altera los patrones de variación esperados según la teoría neutralista, la cual está construida sobre la idea de que la selección que actúa en un sitio nucleotídico no afecta a la variación neutra mayoritaria adyacente. Es necesario que la teoría neutralista abarque bloques de secuencias, y no sitios aislados, para dar cuenta de estas observaciones. De hecho, los genomas de algunas especies pueden visualizarse como mosaicos de piezas que evolucionan unas según un patrón neutro y otras bajo la selección recurrente.

Nuestra tesis es que la teoría neutralista es y seguirá siendo fundamental como marco de referencia para entender la evolución molecular, pero deberá ampliarse para incorporar modelos más complejos que incluyan la selección, la recombinación y los efectos de la interacción entre variantes.

La teoría neutralista deberá ampliarse para incorporar modelos que incluyan la selección, la recombinación y la interacción entre variantes genéticas

Para concluir, tres cualidades definen hoy la teoría neutralista: es una de las más bellas y elegantes teorías de la ciencia; constituye un logro extraordinario del intelecto humano; y ofrece una perspectiva conceptual privilegiada para comprender el modo en que el azar (la mutación y la deriva genética) y la necesidad (la selección natural) dan cuenta de la evolución y la adaptación biológica.

En la frase final de su libro, Kimura reinterpreta, a la luz de su teoría neutralista, el texto final de *El origen de las especies* de Darwin. Sirva esta como colofón de este artículo de celebración de su teoría: «En la profundidad del material genético se ha producido y sigue produciéndose una enorme cantidad de cambios evolutivos... La mayoría de estos no se deben a la selección natural, sino a la fijación aleatoria de mutantes selectivamente neutros o casi neutros. Esto añade todavía más grandeza a nuestra visión de la evolución biológica». IyC

PARA SABER MÁS

Evolutionary rate at the molecular level. Motoo Kimura en *Nature*, vol. 217, págs. 624-626, febrero de 1968.
The neutral theory of molecular evolution. Motoo Kimura. Oxford University Press, 1983.
Molecular population genetics. Sònia Casillas y Antonio Barbadilla en *Genetics*, vol. 205, págs. 1003-1035, marzo de 2017.
Celebrating 50 years of the neutral theory of molecular evolution. Número especial recopilatorio. *Molecular Biology and Evolution*, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría neutralista de la evolución molecular. Motoo Kimura en *IyC*, enero de 1980.
La evolución del darwinismo. G. Ledyard Stebbins y Francisco J. Ayala en *IyC*, septiembre de 1985.
Base molecular de la evolución. Allan C. Wilson en *IyC*, diciembre de 1985.
Repensar a Darwin. Telmo Pievani en *IyC*, enero de 2016.

MATEMÁTICAS

EL NUEVO LENGUAJE DE LAS MATEMÁTICAS

La manera en que se conciben términos y símbolos para representar conceptos matemáticos ha ido cambiando a lo largo de la historia. ¿Puede esta disciplina prescindir de las palabras?

Daniel S. Silver



LGO EXTRAÑO ESTÁ SUCEDIENDO EN LOS SEMINARIOS DE MATEMÁTICAS DE TODO EL mundo. Cada vez se oyen más a menudo palabras y expresiones como *araña*, *huellas de pájaro*, *ameba*, *pila de arena* o *descomposición del pulpo*. Empiezan a verse dibujos que se asemejan a petroglifos prehistóricos o a la antigua caligrafía china, los cuales se manipulan como los números y los símbolos tradicionales del álgebra. Se trata de un lenguaje que resultaría del todo ajeno para los matemáticos de siglos pasados.

Las palabras y los símbolos matemáticos están destinados a estimular el pensamiento, promover la curiosidad o, simplemente, entretener. A veces despiertan la imaginación del público. En ocasiones interfieren con el propio entendimiento de lo que pretenden describir. Y siempre están evolucionando. Hoy, a medida que los límites de la investigación matemática se expanden, esa evolución parece estar acelerándose. Las palabras y los símbolos nos han traído hasta este estado fructífero de la disciplina. Pero la pregunta sigue en pie: ¿pueden los símbolos matemáticos, sin el apoyo de ninguna palabra, bastar para el quehacer de este campo?

¿SON LAS MATEMÁTICAS UNA LENGUA?

Josiah Willard Gibbs navegó siempre con confianza en el mar de las palabras y los símbolos matemáticos. Uno de los fundadores de la mecánica estadística y profesor de física matemática en la Universidad Yale durante la segunda mitad del siglo XIX, Gibbs era conocido como alguien sencillo y sin pretensiones que rara vez se pronunciaba en público. Así que imaginen la sorpresa de sus colegas cuando, durante una reunión del claustro sobre la conveniencia de reducir los contenidos de matemáticas en el currículum de los estudiantes en favor de los de lenguas extranjeras, Gibbs se puso en pie y declaró con contundencia: «Caballeros, las matemáticas *son* una lengua».

Gibbs no fue el primer científico notable que sostuvo algo así. En *El ensayador*, publicado en Roma en 1623, Galileo había escrito: «[El universo] no puede ser leído hasta que hayamos aprendido su idioma y nos hayamos familiarizado con los símbolos en los que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático». Galileo publicaba en italiano y no en latín con la esperanza de llegar a aquellos lectores cultos pero no necesariamente versados en ciencia. Pero, al igual que los estudiantes de la Academia de



DESDE LOS PETROGLIFOS DE NORTEAMÉRICA (*arriba*) a la caligrafía china temprana (*abajo a la izquierda*), la representación simbólica de palabras e ideas cuenta con una larga historia. Hoy, los matemáticos exploran las posibilidades que brindan los símbolos sin palabras. Un ejemplo lo proporciona la notación de «huellas de pájaro» (*abajo a la derecha*), creada por el matemático Predrag Cvitanović, del Instituto de Tecnología de Georgia.

CREATISTA/ISTOCK (*petroglifo*); WIKIMEDIA COMMONS (*caligrafía china*)

Platón eran recibidos con la inscripción «Prohibida la entrada a todo aquel que no sepa geometría», los lectores de Galileo eran advertidos de la necesidad de poseer ciertos prerrequisitos lingüísticos. Para el científico italiano, las letras de las matemáticas eran triángulos, círculos y otras figuras geométricas. Gibbs, responsable de gran parte del cálculo vectorial que usamos hoy, habría agregado uno o dos símbolos de su cosecha.

Si las matemáticas constituyen una lengua, entonces, al igual que ocurre con el francés o el ruso, no deberían depender de ninguna otra para poder ser entendidas; es decir, tendrían que ser independientes del lenguaje ordinario. La idea comienza a parecer un poco menos descabellada si tomamos como ejemplo la notación musical, la cual resulta legible para cualquier músico formado del planeta. Si lo mismo sucede con las matemáticas, deberíamos ser capaces de comprender sus ideas sin recurrir a las palabras. Veamos cómo podría suceder esto.

Considere la tarea de sumar los cinco primeros números naturales: 1 + 2 + 3 + 4 + 5. Muy sencillo: el resultado es 15. Pero ¿qué pasa con los cien primeros números naturales? La figura inferior de la página siguiente muestra 1 + 2 + 3 + 4 + 5 puntos dos veces, una en negro y otra en rojo. Al disponerlos en forma rectangular como indica la imagen, es fácil ver que el total asciende a $5 \times 6 = 30$. Para hallar el resultado de la suma inicial, basta con dividir por 2 la cifra que acabamos de obtener a fin de corregir el doble contaje. La novedad de la imagen es que nos permite captar la idea de un vistazo. Además, no hay nada especial en cinco columnas de puntos; podemos imaginar muy fácilmente lo que ocurriría con cien. Por tanto, $1 + 2 + ... + 100$ ha de ser igual a $100 \times 101/2 = 5050$. Y, de igual modo, podemos deducir que la suma de los primeros N números naturales es $N(N + 1)/2$.

Así como Mendelssohn disfrutó escribiendo sus *Romanzas sin palabras*, a los matemáticos les gusta elaborar demostraciones sin palabras. Desde 1975, la Asociación Matemática Americana viene publicando una sección dedicada a ellas en su revista *Mathematics Magazine*. Los ejemplos están destinados a dejar boquiabierto al lector. Pero, a pesar de la gran cantidad de demostraciones conocidas de este tipo, el pensamiento matemático sin palabras puede que sea imposible. Las palabras vienen automáticamente a nuestra mente cuando vemos imágenes. Las imágenes acuden a nosotros cuando vemos palabras. Así que, después de todo, parece que sí las necesitamos.

El papel de las palabras en las matemáticas rondaba la cabeza del matemático francés Jacques Hadamard cuando, durante los años cuarenta del siglo XX, preguntó a sus colegas a lo largo y ancho del mundo qué opinaban del tema. ¿Pensaban con imágenes o con palabras? Sus hallazgos quedaron resumidos en la obra *The psychology of invention in the mathematical field* («La psicología de la invención en el campo de la matemática»). Uno de los encuestados fue Albert Einstein, quien escribió: «Las palabras o la lengua, ya sean escritas o pronunciadas, no parecen cumplir ninguna función en mi mecanismo de pensamiento. Las entidades psíquicas que parecen servir como elementos en el pensamiento son determinados signos e imágenes, más o menos claros, los cuales pueden "voluntariamente" reproducirse y combinarse».

Pero incluso aquellos matemáticos que pudieran estar de acuerdo con Einstein reconocerían la grave limitación que impone al pensamiento el uso exclusivo de imágenes. En 1983, el matemático neozelandés-estadounidense Vaughan Jones dio en el clavo al reproducir la figura de un gran punto negro para ilustrar la red de proyección de los factores de II_1 (leído «tipo dos-uno»), un complejo objeto algebraico que Jones usó más tarde para crear nuevas herramientas en teoría de nudos y que, siete años después, le valdrían la prestigiosa medalla Fields. Aunque aquel gran punto negro no era completamente gratuito (surgió al pensar en los factores en términos de círculos concéntricos), fue creado deliberadamente como un comentario humorístico sobre los límites de la representación gráfica. «Algunas personas disfrutaron de la broma», me dijo Jones.

Tanto si las matemáticas constituyen un idioma propio como si no, sus palabras comparten con el lenguaje ordinario una función clave: transportan imágenes esenciales de una mente a otra. Por esa razón, la manera en que escogemos las palabras sí reviste importancia.



Daniel S. Silver es profesor emérito de matemáticas de la Universidad del Sur de Alabama. Su investigación explora la relación entre nudos y sistemas dinámicos, así como la historia de la ciencia y la psicología de la invención.

SIGNIFICADOS MÚLTIPLES

En 1948, mientras desarrollaba la teoría de la información en los Laboratorios Bell, Claude Shannon creó una hermosa expresión algebraica relacionada con la incertidumbre promedio asociada a una fuente de información. Su similitud formal con la noción de entropía en mecánica estadística fue señalada por muchos, entre ellos el matemático John von Neumann. En 1961, Shannon reveló la siguiente anécdota durante una entrevista: «Mi mayor preocupación fue cómo llamarla. Pensé en *información*, pero la palabra ya había sido muy usada, así que me decidí por *incertidumbre*. Cuando lo discutí con John von Neumann, este tuvo una idea mejor. Me dijo: "Deberías llamarla entropía, por dos razones. En primer lugar, tu función de incertidumbre ya ha sido usada con ese nombre en mecánica estadística, por lo que ya tiene un nombre. Y en segundo lugar, y más importante, nadie sabe realmente lo que es la entropía, de modo que en un debate siempre llevarás ventaja".».

EN SÍNTESIS

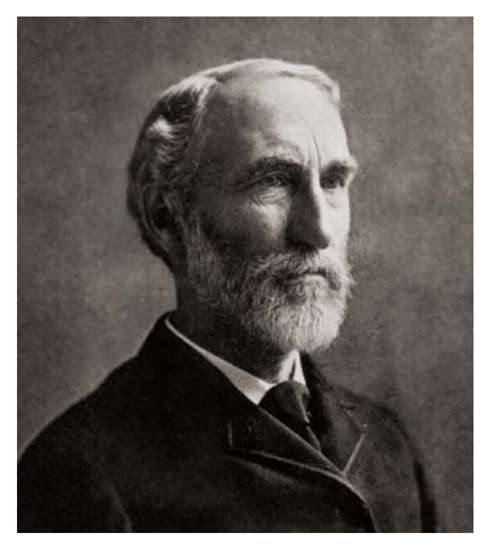
A lo largo de la historia, varios científicos han defendido que las matemáticas constituyen una lengua propia. De ser el caso, sus ideas no deberían depender del lenguaje ordinario para poder expresarse.

Los símbolos matemáticos han evolucionado a partir de las palabras; sin embargo, su naturaleza parece ser muy distinta de la de estas. Algunas áreas específicas de la matemática ya han conseguido dotarse de lenguas simbólicas.

Hoy los matemáticos usan lenguajes pictóricos para pensar de manera más profunda sobre preguntas fundamentales. Esa evolución sugiere que las matemáticas podrían ser más generales que cualquier lengua ordinaria que trate de expresarlas.

Aunque el segundo motivo esgrimido por Von Neumann probablemente fuese una broma, la conversación realza la importancia de elegir con cuidado las palabras si lo que buscamos es fomentar la comprensión. Al igual que Shannon, numerosos matemáticos se desesperan a la hora de inventar nuevos términos, con la esperanza de que aquellos que finalmente escojan pervivan durante décadas. La elección de Shannon acabaría resultando brillante por tres razones.

Primero, los matemáticos disfrutan de la autoridad que emana de las palabras tomadas prestadas de la ciencia, en especial de la física. Von Neumann se hallaba en lo cierto cuando dijo que el uso de *entropía* confería una ventaja al hablante: los miembros de su audiencia conocerían el significado del término o, si no, sentirían que debían conocerlo. En segundo lugar, que Shannon se apropiara del término provocó un profundo debate: ¿existía realmente una conexión con la mecánica estadística? Ese debate ha sido productivo y, hoy, la entropía en mecánica estadística es considerada por muchos como un caso particular de la idea de Shannon. Por último, la gran popularidad de su teoría de la información se apoyó en el uso de una palabra reconocible —aunque no necesariamente comprendida— por todo el mundo: su asociación con el desorden en la vida cotidiana suscita una respuesta empática por parte de todos. Así ocurre también con otro término matemático muy popular: *caos*.



JOSIAH WILLARD GIBBS fue profesor de física matemática en Yale en el siglo XIX. A pesar de su actitud reservada, expresó con vehemencia su opinión de que las matemáticas constituían una lengua propia.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO (*Josiah Willard Gibbs*)

¿QUÉ HAY EN UN NOMBRE?

«¿Debe un nombre significar algo?», preguntó dubitativa Alicia. «Por supuesto que debe», fue la enfática respuesta de Humpty Dumpty a la pregunta de la niña en *A través del espejo*. El matemático James Yorke, de la Universidad de Maryland, habría replicado de igual manera a la pregunta de Alicia. En una conversación reciente conmigo, recordó su decisión de adoptar el término *caos* para un fenómeno matemático asociado a un tipo de comportamiento impredecible que nos encontramos en numerosos fenómenos físicos, desde el goteo de un grifo hasta el comportamiento del tiempo meteorológico: «Las palabras deben significar algo», insistió. Descartó el consejo de sus colegas, que le animaron a decantarse por un término más desapasionado. Yorke, sin embargo, deseaba atrapar el sentimiento que todos albergamos sobre la aleatoriedad de la vida.

La jerga matemática suele pasar en silencio por el mundo, siendo solo reconocida por los investigadores del ramo. *Caos* fue una excepción. En 1975, Yorke y Tien-Yien Li, de la Universidad Estatal de Míchigan, demostraron un sorprendente teorema sobre funciones continuas en un intervalo y lo plasmaron en un breve artículo titulado «Período tres implica caos». ¿Qué demostraron Yorke y Li?

Pensemos en una de tales funciones como si fuera una máquina: introducimos en ella un número a perteneciente al intervalo en cuestión y obtenemos un valor, b. Si ahora insertamos b en nuestra máquina, esta nos proporcionará un tercer número, c. Después introducimos c y obtenemos d. Si ocurre que $d = a$, entonces diremos que a tiene período tres. De manera semejante, un número dado puede tener período cuatro, cinco, etcétera. Lo que Yorke y Li demostraron fue que, para funciones continuas, si algún número tiene período tres, podremos encontrar números con el período que deseemos. También hallaron que muchos números tienen sucesivas salidas que nunca regresan a su valor inicial. Y, más sorprendente aún, resulta posible hallar pares de tales números no periódicos tan próximos entre sí como deseemos, cuyas sucesivas iteraciones se alejarán entre sí. Se trata de un ejemplo en el que existe una enorme sensibilidad a las condiciones iniciales; es decir, de una situación caótica.

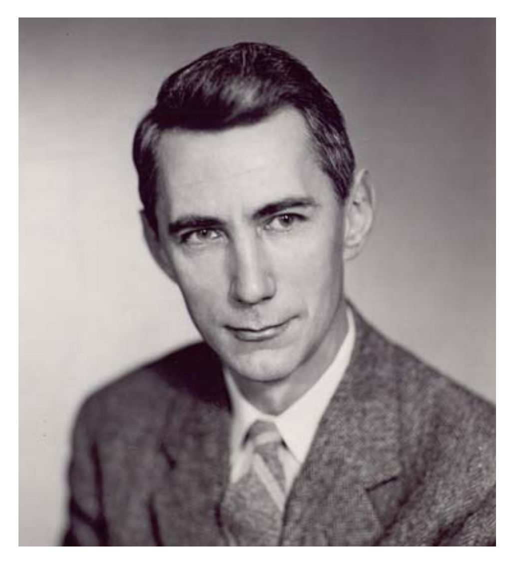
Si Yorke y Li hubieran publicado su artículo en una revista especializada en sistemas dinámicos, es poco probable que *caos* hubiera atrapado la imaginación del público. La palabra ya había aparecido con otro significado en un artículo titulado con el maravilloso oxímoron «El caos homogéneo» y firmado por Norbert Wiener, el creador de la cibernética. Wiener publicó su trabajo en 1938 en el *American Journal of Mathematics*. Sin embargo, Yorke y Li lo hicieron en el *American Mathematical Monthly*, una revista editada por la Sociedad Matemática Americana y destinada a un amplio número de lectores, desde estudiantes universitarios a investigadores. Cuando, un año después, el biólogo Robert May lo leyó y escribió sobre sus implicaciones para los modelos de poblaciones en la revista *Nature*, la palabra *caos* apareció coronando la primera página. De acuerdo con Yorke, fue entonces cuando el término despegó.

UNA MATRIZ DE PUNTOS puede emplearse como demostración visual de que 1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15. El resultado equivale a la cantidad de columnas necesarias para representar todos los dígitos (5), multiplicada por el número de filas necesarias para representar el mayor de ellos (6) y dividida entre dos. La imagen, generalizable a la suma de los primeros *N* enteros, ilustra cómo una demostración matemática puede trascender las palabras.

¿Cuánto tiempo necesita un término matemático para conquistar la imaginación del público? A los diez años, el libro de James Gleick *Caos: La creación de una ciencia* se había convertido en un éxito editorial. La obra, que en 2017 cumplió treinta años, comienza con las ideas de Edward Lorenz. En 1961, este

matemático y meteorólogo se percató de que, a lo largo de extensos períodos de tiempo, los patrones que predecía su modelo climático cambiaban de manera drástica si las condiciones iniciales se alteraban tan solo ligeramente. Y aunque el fenómeno no era nuevo para los matemáticos —el francés Henri Poincaré ya había escrito al respecto en los albores del siglo xx—, supuso una conmoción para muchos científicos. Las condiciones para que se produzca una tormenta aquí y hoy, sugirió Lorenz, podrían haber sido causadas varias semanas antes por el aleteo de una mariposa en Brasil. *Efecto mariposa* fue la expresión que acuñó para afianzar la metáfora.

Para que un término matemático prenda en los lectores debe excitar su imaginación. Al respecto, una imagen potente resulta de ayuda. En lo que atañe a *caos*, esta fue suministrada por el propio Lorenz: se trataba de un ovillo de curvas, hoy conocido como atractor de Lorenz, que evocaba el infinito número de soluciones de un sistema de tres ecuaciones diferenciales. Además, se parecían a las alas de una mariposa. Si comenzamos en cualquier punto de una de esas curvas y la seguimos, acabaremos visitando alternativamente las dos alas de la mariposa. Pero, si comenzamos en un punto cercano de otra curva, la pauta en el recorrido se tornará muy distinta después de un tiempo. El atractor de Lorenz se convirtió así en el emblema de un nuevo y extenso campo: la teoría del caos.



EN 1948, CLAUDE SHANNON tomó prestado de la mecánica estadística el término *entropía* para bautizar una expresión relacionada con la cantidad de información. La palabra atrajo atención generalizada. Hoy, algunos investigadores consideran que la noción de entropía en mecánica estadística no constituye más que un caso particular de la entropía de Shannon.

ELEGIR CON CUIDADO

Las expresiones y palabras mal elegidas pueden interponerse en el progreso de las matemáticas. René Descartes nos mostró un ejemplo: mientras reflexionaba sobre las soluciones de las ecuaciones algebraicas, se vio obligado a considerar la posibilidad de que existieran números que, al multiplicarlos por sí mismos, dieran un resultado negativo. Sin duda, no hay ningún número «real» (aquellos que podemos situar en la recta homónima a la que estamos acostumbrados) que satisfaga esa propiedad. Por tanto, Descartes llamó *imaginarios* a los números que la cumplían. En *La géométrie*, su tratado de 1637 para unificar geometría y álgebra, explicó que «las raíces verdaderas o falsas pueden ser reales o imaginarias». La expresión *número imaginario* prendió.

Carl Friederich Gauss, uno de los grandes matemáticos de todos los tiempos, despreció el término. En 1831, escribió: «Si esta cuestión [se ha visto] envuelta en misterio y rodeada de oscuridad, es en gran medida por culpa de una terminología inadecuada». Gauss prefirió el término menos censor de *números complejos*, que incluye tanto los números ordinarios («reales») como los «imaginarios», los cuales aparecen en expresiones del estilo de $2 + \sqrt{-3}$. Por desgracia, la palabra acuñada por Descartes sigue en circulación, lo que supone un obstáculo añadido para los profesores que tratan de convencer a sus estudiantes de que los números complejos son algo más que imaginarios y que cuentan con aplicaciones en todas las ciencias [*véase* «Los números imaginarios son reales», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, febrero de 2018].

En 1670, Isaac Newton aportó palabras tan terriblemente engorrosas como *fluentes*, *fluxiones* e incluso *ffluxiones*. Estos términos pretendían describir la trayectoria y la velocidad de un fluido en movimiento, pero definirlos de manera rigurosa resultó difícil incluso para el genio de Cambridge. Durante más de un siglo, los matemáticos trataron de clarificar su sentido y fallaron debido a las nociones metafísicas sobre el tiempo que acarreaban. Durante el siglo xix, términos rigurosos y eficaces, como *límite* o *derivada*, se desarrollaron sin hacer mención al tiempo y los matemáticos abandonaron los propuestos por Newton.

A los matemáticos británicos del siglo xix les encantaba inventar palabras y expresiones nuevas. Sin embargo, comenzaron con mal pie. En 1801, el profesor de Cambridge John Colson, que fue titular de la cátedra Lucasiana (previamente ocupada por Newton y más tarde por Stephen Hawking), publicó la traducción inglesa de *Instituzioni analitiche ad uso della gioventù italiana* («Fundamentos de análisis para uso de la juventud italiana»), un manual de cálculo escrito en 1748 por Maria Agnesi. Fue una pena que Colson no supiera mucho italiano. Aprendió lo suficiente para seguir la traducción a duras penas, dejando caer una peligrosa roca en el camino.

En su libro, Agnesi describía una curva a la que se refería como *la versiera*. La palabra era una adaptación, propuesta por el también italiano Guido Grandi, del término latino *versoria*, el cual significa «escota», el cabo que sirve para cazar las velas de un barco. Era una imagen útil. Pero Colson no pudo encontrar la *versiera* de Agnesi en ningún diccionario, por lo que usó la palabra más cercana que halló: *l'avversiera*, que en italiano significa «bruja» o «diabla». Así que el británico escribió: «La ecuación de la curva descrita, a la que vulgarmente se denomina "la bruja"...». Hoy existen libros de texto que continúan usando el término *bruja de Agnesi*, y los estudiantes siguen mirando la curva y preguntándose qué fuerzas demoníacas le dan forma. Irónicamente, Agnesi fue una mujer devota que dedicó la mayor parte de su vida a ayudar a los pobres.

Ningún matemático británico fue mejor creador de neologismos que James Joseph Sylvester. Nacido en Londres en 1814, asistió a la Universidad de Cambridge, si bien nunca obtuvo el título porque, en su calidad de judío, no suscribió los treinta y nueve artículos de religión de la Iglesia anglicana. Consiguió mantenerse enseñando en el laico Colegio Universitario de Londres y trabajando como actuario hasta que, en 1876, fue nombrado para una cátedra en la recién fundada Universidad Johns Hopkins, en Estados Unidos. Allí creó el primer departamento de investigación matemática del país y su primera revista del ramo, la mencionada *American Journal of Mathematics*.

Sylvester amaba el lenguaje casi tanto como las matemáticas. Compuso poesía que fue poco apreciada por sus contemporáneos y, en 1870, se autopublicó el pequeño volumen *Las leyes del verso*,

CORTESÍA DE TEKNISKA MUSEET/FLICKR/CC BY SA 2.0

EL ATRACTOR DE LORENZ es un conjunto de curvas que describen las soluciones de un sistema de tres ecuaciones diferenciales. Semejante a las alas de una mariposa, la figura acabó convirtiéndose en un emblema del concepto de caos. La imagen y el propio término *caos* arraigaron en el imaginario colectivo e iluminaron una idea clave de la matemática de las últimas décadas.

donde propuso reglas para una correcta versificación. Como era de esperar, Sylvester acuñó multitud de términos matemáticos. Al final de su artículo «Sobre una teoría de las relaciones sizigéticas de dos funciones integrales racionales», publicado en 1853, adjuntó un glosario de «términos nuevos o inusuales, o usados en un sentido nuevo o inusual en la presente memoria». Comenzaba con *alótrico*, *apocopado* y *bezóutico*; continuaba con *monotema, perimétrico* y *rizórico*, y terminaba con *umbrío*, *peso* y *zeta*.

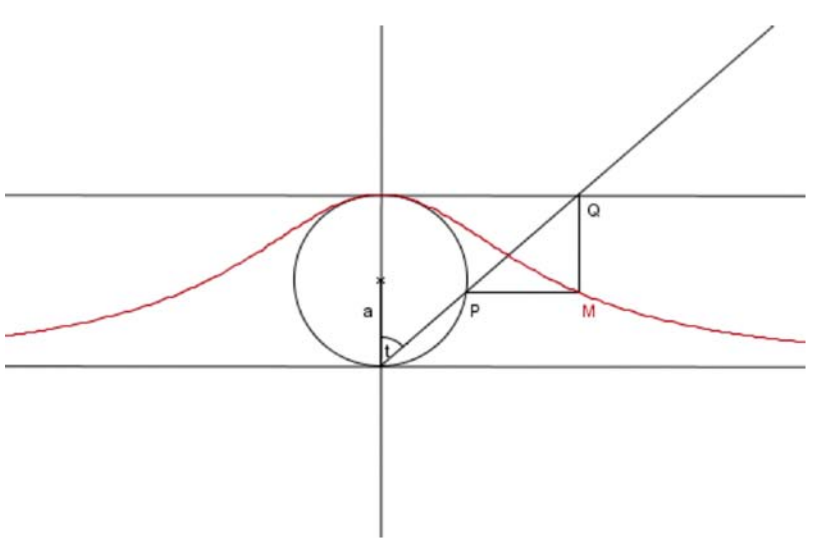
Aunque la mayoría de las palabras inventadas por Sylvester acabaron pasando al olvido, algunas sobrevivieron. Tal vez su contribución más notable al léxico matemático fuese *matriz*: una disposición cuadrada o rectangular de números ordenados en filas y columnas. De origen latino, la palabra significa «útero». Sylvester se hallaba especialmente interesado por las matrices cuadradas, en las que el número de filas es igual al de columnas. Y dado que una matriz rectangular puede, por así decirlo, «engendrar» una matriz cuadrada al eliminarse de ella las filas o las columnas no deseadas, el término y su evocación a la fertilidad parecían apropiados. La palabra *matriz* aparece en todos los campos de la matemática. Y, al igual que *caos*, ha cautivado la imaginación popular. Sylvester habría estado encantado de saber que, a finales del siglo xx, una película de ciencia ficción de Hollywood y un automóvil llevarían ese nombre.

UNA IMAGEN VALE MÁS QUE MIL SÍMBOLOS

La naturaleza de los símbolos matemáticos parece ser muy distinta de la de las palabras que los acompañan. Sin embargo, los primeros han evolucionado a partir de las segundas. El filólogo e historiador alemán del siglo xix Heinrich Nesselmann fue el primero en apuntarlo. Identificó tres etapas de su evolución: la retórica, la sincopada y la simbólica. Un ejemplo ilustrativo lo hallamos en el humilde signo menos que usamos para representar la resta. En la Europa medieval, la sustracción se anotaba mediante la palabra *minus* (latín), *moins* (francés) o *meno* (italiano). Sin embargo, en el siglo xv el término se abrevió a $\overline{m}$. Y el símbolo – comenzó a reemplazar a $\overline{m}$ en 1489, año en que Johannes Widmann publicó un libro de aritmética comercial con la frase: «Lo que – es, es menos; y el + es más».

Con independencia de su origen, los símbolos siempre han sido una fuente de misterio para los matemáticos, ya que parecen hacer algo más que limitarse a reemplazar palabras. Gottfried Wilhelm Leibniz, que comparte junto con Newton el crédito de haber descubierto el cálculo diferencial, así lo creía. El alemán estaba tan cautivado por los símbolos que soñó con un idio-





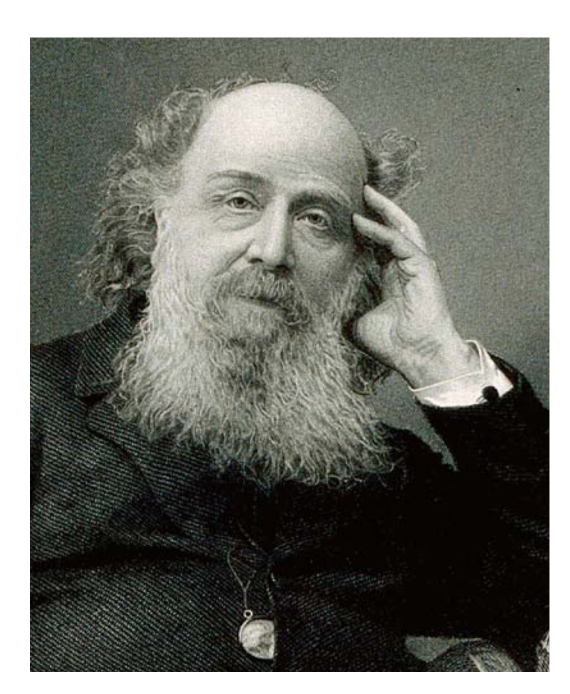
MARIA GAETANA AGNESI (*izquierda*) fue autora de un manual italiano de matemáticas publicado en 1748. En él describió una curva (*derecha*) a la que llamó *versiera*, adaptación de la palabra latina *versoria*, «escota», la cuerda que sirve para sujetar las velas de un barco. Cuando, en 1801, la obra fue traducida al inglés por el matemático John Colson, este confundió esa voz italiana por otra similar pero que significaba «bruja». Aquel error de traducción aún pervive en algunos libros de texto, que para confusión de los estudiantes llaman a la curva «la bruja de Agnesi». La anécdota ejemplifica la importancia de elegir con tino el nombre de los conceptos matemáticos.

PAUL BOURKE (*atractor de Lorenz*); WELLCOME COLLECTION/CC BY 4.0 (*Maria Gaetana Agnesi*)

ma puramente simbólico; uno con el que las naciones podrían algún día resolver sus disputas usando el cálculo en lugar de las espadas y los cañones. Leibniz imaginó un alfabeto de ideas.

Aunque el polímata nunca encontró su lengua universal, otros sí han tenido éxito en la búsqueda de idiomas ideográficos con funciones más especializadas. El matemático y filósofo alemán Gottlob Frege pensó que había encontrado una manera de comunicarse solo con símbolos. En 1879 publicó su *Begriffsschrift*, un pequeño libro de 88 páginas en el que por primera vez aparecieron los cuantificadores de la lógica formal. Frege describió su trabajo como «una lengua de fórmulas para el pensamiento puro basada en la aritmética». Los diagramas anegaban sus páginas no solo de izquierda a derecha, sino también de arriba abajo.

Aunque hoy la obra de Frege es considerada por muchos como el trabajo individual más importante de la lógica, en su día fue ridiculizada. John Venn, recordado por sus diagramas epónimos, describió el *Begriffsschrift* como «engorroso e inadecuado». Otro influyente lógico, Ernst Schröder, lo tachó de «monstruoso derroche de espacio», y le afeó que se entregase «a la costumbre japonesa de escribir en vertical». Frege no solo se enfrentó a la resistencia de los lectores; sus fórmulas bidimensionales y otros símbolos exóticos sublevaron a su tipógrafo. «Después de todo», argumentaría Frege años más tarde, «lo más conveniente para el tipógrafo no es, ni mucho menos, el *summum bonum* [el más alto bien].» Hoy, los costes asociados a la composición tipográfica, antaño una maldición para los matemáticos, han desaparecido gracias a los programas informáticos que permiten a los autores crear manuscritos listos para su publicación en revistas especializadas. Sin embargo, la renuencia de la comunidad matemática a adoptar argumentos visuales ha enlentecido la aceptación de estos últimos.



JAMES JOSEPH SYLVESTER, profesor de la Universidad Johns Hopkins a finales del siglo XIX, inventó un gran número de términos matemáticos; entre ellos, la popular palabra *matriz*. Sylvester la tomó prestada de la voz latina para «útero», probablemente porque una ordenación rectangular de números en filas y columnas puede «engendrar» una disposición cuadrada.

WELLCOME COLLECTION/CC BY 4.0

Las imágenes han acompañado a las demostraciones matemáticas desde los tiempos de Euclides. No obstante, una imagen puede también confundirnos, al hacernos creer que el caso especial que ilustra es lo suficientemente general. Desde finales del siglo XIX, algunos ejemplos poco intuitivos procedentes del campo de la topología pusieron en duda nuestra intuición espacial y las demostraciones que dependían de ella. La «curva que llena el espacio» de Giusseppe Peano fue uno de esos ejemplos: trate de imaginar una curva continua que pase por todos los puntos del interior de un cuadrado. Pocos pueden, pero Peano logró construir una curva de tales características empleando para ello un proceso recursivo infinito. Con todo, no hay imagen que pueda representarla por completo.

La reticencia de los matemáticos a aceptar imágenes en lugar de palabras se ha suavizado, pero no ha desaparecido del todo. Hoy, resulta tan habitual como incómodo para quien presenta un argumento visual escuchar cómo alguien pregunta: «Pero... ¿es eso una verdadera demostración?». Predrag Cvitanović, del Instituto de Tecnología de Georgia, conoce bien la experiencia. Recuerda la burla de un colega que miraba los pictogramas que había plasmado en una pizarra: «¿Qué son esas huellas de pájaro?». A Cvitanović le gustó tanto el símil ornitológico que decidió adoptar aquel nombre (*birdtrack*) para su nueva notación.

¿En qué consisten esas «huellas de pájaro»? En pocas palabras, se trata de combinaciones de puntos, líneas, cajas, flechas y otros símbolos: letras de una lengua diagramática concebida para cierto tipo de álgebra. Se inspiraron en el célebre artículo de electrodinámica cuántica escrito en 1948 por Richard Feynmann, así como en trabajos posteriores del físico matemático Roger Penrose. Como explicó Cvitanović en 1984 en su libro *Group theory: Birdtracks, Lie's, and exceptional groups*, los diagramas representan una evolución del lenguaje. No son meros recursos mnemotécnicos o una simple ayuda para el cálculo. Antes bien, «lo son todo: a diferencia de los diagramas de Feynman, aquí todos los cálculos se llevan a cabo con huellas de pájaro, desde el comienzo hasta el final». ¿Sería posible trabajar sin ellos? Sí. Pero, como advierte Cvitanović, sería como hablar italiano sin usar las manos.

Las huellas de pájaro no constituyen el único lenguaje pictográfico usado por los matemáticos. Louis H. Kauffman, investigador de la Universidad de Illinois en Chicago y uno de los topólogos más inventivos e influyentes de nuestro tiempo, emplea toda una variedad de lenguas diagramáticas para el estudio de la teoría de nudos. Al igual que le ocurriría a un viajero que puede entender parcialmente un idioma extranjero que se parece al suyo, un algebrista familiarizado con las huellas de pájaro reconocería mucho de lo que viera en *Formal knot theory*, el libro de Kauffman sobre teoría de nudos, pero no todo.

Las álgebras planares constituyen otro ejemplo de lengua en imágenes. Jones, al que mencionamos más arriba al hablar del gran punto negro, las presentó en 1999, y proporcionan un entorno general para cantidades importantes en el estudio de los nudos. Los pictogramas básicos de esta lengua son los «enredos planares» (*planar tangles*): discos que contienen en su interior otros discos de menor tamaño, conectados por segmentos y decorados con estrellas y sombras. Estos pictogramas pueden a su vez combinarse con otros para formar nuevos caracteres. Las propiedades que exhiben remedan las de diferentes estructuras algebraicas y topológicas familiares para los investigadores.

Las huellas de pájaro y las álgebras planares constituyen pictolenguajes inspirados inicialmente en la física. Todavía nos queda otro: el *quon*, presentado en diciembre de 2016 en el repositorio en línea de artículos científicos arxiv.org. Creado en Harvard por los matemáticos Zhengwei Liu, Alex Wozniakowski y Arthur M. Jaffe, este lenguaje procede de imágenes tridimensionales

A LO LARGO DE LA HISTORIA se han sucedido los intentos de crear lenguajes matemáticos puramente simbólicos. Un diagrama de Gottlob Frege publicado en 1879 (*arriba, izquierda*) representa el siguiente enunciado: «Si *b* implica *a*, la negación de *a* implica la negación de *b*». Louis Kauffman, de la Universidad de Illinois, ha usado pictogramas para argumentar que cierta cantidad asociada a un nudo no depende de la forma en que este se haya dibujado (*arriba, centro*). El lenguaje *quon* (*derecha*) aparece aquí usado para representar expresiones en el álgebra de Frobenius. Los discos conocidos como «enredos planares» (*abajo*) se emplean para expresar propiedades en álgebra planar.

WIKIPEDIA

inspiradas en partículas excitadas y de las transformaciones que actúan sobre ellas. Una versión anterior, más simple, guarda mucho en común con los sistemas de Cvitanović y Kauffman.

Según sus inventores, el lenguaje quon puede hacer algo más que ayudar en el estudio de la información cuántica. Resulta también adecuado para el álgebra y la topología, pues permite demostrar teoremas en ambos campos. En una entrevista en la *Harvard Gazette*, Jaffe comentó: «Este lenguaje pictórico puede aportar ideas y una forma de pensar que no vemos en la manera algebraica usual de acercarnos a las matemáticas [...] Al final, una imagen vale más que mil símbolos».

MÁS QUE OTRA LENGUA

Algo extraño está sucediendo en los seminarios de matemáticas, pero va más allá de imágenes y sonidos divertidos. Los investigadores tratan de romper las barreras del lenguaje tradicional para pensar de una manera más profunda sobre preguntas fundamentales. Sus extrañas palabras e imágenes llaman la atención y nos motivan a todos a aprender más sobre ellas.

En una serie de conferencias impartidas en Cornell en 1965, Richard Feynman habló sobre la efectividad de las matemáticas en la ciencia. Allí nos presentaba a un lector lego que se preguntaba por qué no era posible explicar las ideas matemáticas con lenguaje ordinario. Corrigiendo a Gibbs, con quien comenzábamos nuestra discusión, Feynman respondió que eso ocurría «porque las matemáticas no son *solo* otra lengua». Es decir, serían más generales que cualquier idioma ordinario que trate de expresarlas.

Los métodos tradicionales de aprendizaje de las matemáticas son discursivos. Estos exigen una comprensión secuencial, paso a paso. Cuando una explicación tiene éxito, sobreviene un momento «¡ajá!» en el que se encienden las luces y la habitación se nos ilumina. Pero tal vez algún día seamos capaces de accionar el interruptor tan pronto como entremos en la habitación. La filósofa y lógica Susanne K. Langer hizo en cierta ocasión un llamamiento a revolucionar nuestras formas de comunicación, a ir más allá de nuestra «pequeña isla encorsetada por la gramática». Nuestro viaje de las palabras a los símbolos y de estos al lenguaje pictórico nos está acercando cada vez más a esa revolución que preconizaba Langer. IyC

© American Scientist Magazine

PARA SABER MÁS

Philosophy in a new key. Susanne K. Langer. Harvard University Press, 1942.
The psychology of invention in the mathematical field. Jaques Hadamard. Princeton University Press, 1945.
Group theory: Birdtracks, Lie's, and exceptional groups. Predrag Cvitanović. Princeton University Press, 2008.
Caos: La creación de una ciencia. James Gleick. Drakontos, 2012.
Quon 3D language for quantum information. Zhengwei Liu, Alex Wozniakowski y Arthur M. Jaffe en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 114, págs. 2447-2502, marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El lenguaje de los fractales. Hartmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe en *IyC*, octubre de 1990.
La física y los diagramas de Feynman. David Kaiser en *IyC*, septiembre de 2005.
La irrazonable eficacia de las matemáticas. Mario Livio en *IyC*, noviembre de 2011.
El lenguaje y la razón. Gottfried Vosgerau en *IyC*, octubre de 2012.

Jena Pincott, bióloga de formación, escribe sobre ciencia. Ha publicado varios libros, como *¿Los amantes del chocolate tienen bebés más dulces?* y *La sorprendente ciencia del embarazo* (en inglés, Free Press, 2011). Ha colaborado con *The Wall Street Journal*, Oprah.com, *Psychology Today* y *Nautilus*, entre otros medios.



SALUD

LA ENDOMETRIOSIS, UN MISTERIO DOLOROSO

Esta enfermedad, que se extiende por el cuerpo como la hiedra causando fuertes dolores y esterilidad, afecta a unos 176 millones de mujeres en el mundo. A la ciencia le ha resultado difícil abordarla, pero los nuevos avances han despertado la esperanza de lograr pronto mejores tratamientos

Jena Pincott

Ilustración de Katherine Streeter

EN SÍNTESIS

A pesar de que cerca del diez por ciento de las mujeres del planeta la padecen, la endometriosis sigue siendo una incógnita médica.

Se ignora por qué las células epiteliales que tapizan el útero escapan y proliferan en otras partes del cuerpo, donde provocan dolor intenso, inflamación y formación de tejido cicatricial.

Desatendida y poco estudiada durante mucho tiempo, la endometriosis empieza a adquirir visibilidad. Con el despegue de la investigación, las pacientes esperan disponer pronto de mejores tratamientos.



LAS MUJERES CON ENDOMETRIOSIS no olvidan nunca cómo empezó todo; la primera vez que supieron que ese dolor en la pelvis no podía ser normal. Emma recuerda el día que se desmayó en clase de historia, durante el último curso de secundaria. Cuenta que pensó que así se sentiría una calabaza cuando la tallan para la noche de difuntos. Su ginecólogo dio por sentado que se trataba de una menstruación dolorosa y le recetó anticonceptivos. Le fueron bien, pero no lo suficiente. «Me hizo sentir como una tonta», refiere Emma, ahora a finales de la treintena y que pidió aparecer con este seudónimo. «Mucho más tarde me di cuenta de que, si el problema médico de una mujer no está bien claro, simplemente no la creen.»

Tuvieron que pasar seis años desde aquel desmayo hasta dar con un médico que le aconsejó una laparoscopia abdominal para buscar la causa del dolor. Solo entonces supo que padecía endometriosis, un trastorno provocado por el tejido que reviste la cavidad del útero (endometrio), que escapa y prolifera en otras partes del cuerpo. Por entonces, había tapizado sus órganos pélvicos como una hiedra invasora.

Este símil vegetal parece apropiado para describirla. Igual que una trepadora vigorosa que se enrosca sobre matas y árboles sofocando todo lo que encuentra a su paso, así actúan las adherencias (tejido cicatricial o fibrosis) formadas por las células endometriales incontroladas que se implantan fuera de lugar. Estas lesiones envuelven o unen entre sí la vejiga, el intestino, los uréteres en su trayecto desde los riñones y otros órganos pélvicos. Si se extirpan, suelen reaparecer: más de la mitad de las mujeres operadas han de pasar de nuevo por el quirófano antes de siete años. El cirujano puede encontrar el intestino, los ovarios y el nervio ciático enmarañados en un macramé de tejido cicatricial, o una trompa de Falopio tan oprimida que el óvulo no puede transitar por ella.

A pesar del daño evidente que causa, la endometriosis es un misterio. Los médicos saben que existe una predisposición familiar vinculada con diversas variantes genéticas (la heredabilidad ronda el 50 por ciento), pero los genes tampoco consiguen explicar su aparición ni predicen su evolución. El grado de fibrosis y el número y la localización de las lesiones guardan escasa relación con la intensidad de los síntomas, que, además del dolor, comprenden menstruación profusa (menorragia) y molestias durante el coito o la defecación, a los que a menudo se ha de sumar una esterilidad profundamente frustrante. La extirpación quirúrgica y los medicamentos alivian a algunas pacientes, mientras que otras, aún con lesiones limitadas, padecen un dolor incesante pese a todos los remedios probados.

Durante décadas, la endometriosis no ha recibido la debida atención y su estudio ha contado con escasos fondos. El dolor y otros síntomas reducen la productividad laboral en casi 11 horas a la semana (el 27 por ciento de la semana de 40 horas), según los resultados del Estudio Internacional de Salud de la Mujer publicado en 2011, que evaluó a más de 1400 mujeres en 10 países.

Pero al fin, las asociaciones de pacientes, el activismo en las redes sociales y los movimientos de mujeres en pro del cambio social han empezado a llamar la atención sobre el problema, y la comunidad médica comienza a reconocer la histórica desatención de los problemas de salud femeninos. Los investigadores están desarrollando instrumen-

ORIGEN Y ANATOMÍA DEL TRASTORNO

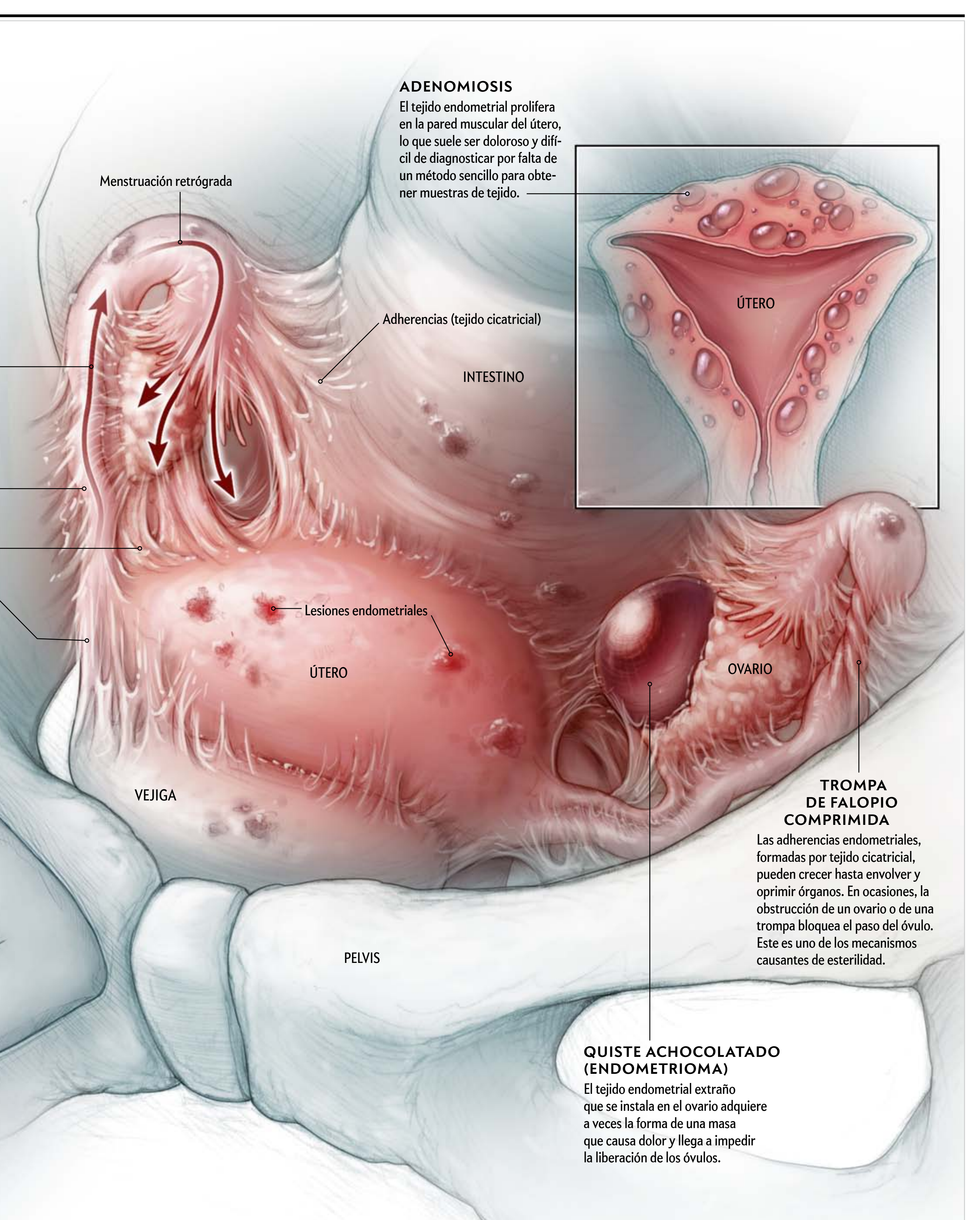
Dolor irruptor

La endometriosis es un trastorno sumamente doloroso que afecta a cerca del diez por ciento de la población femenina, pero que desconcierta a los científicos. Surge cuando las células endometriales, que revisten las paredes del útero, se escapan y proliferan en otro lugar, donde causan inflamación y fibrosis.

MENSTRUACIÓN RETRÓGRADA

Según una teoría arraigada, la endometriosis se origina cuando el líquido menstrual remonta las trompas de Falopio hasta el abdomen durante la regla. Allá donde se implanta, el endometrio prolifera y se descama con el ciclo menstrual. La sangre y el tejido atrapados dan lugar a fibrosis e inflamación.




ADENOMIOSIS
El tejido endometrial prolifera en la pared muscular del útero, lo que suele ser doloroso y difícil de diagnosticar por falta de un método sencillo para obtener muestras de tejido.
Menstruación retrógrada
Adherencias (tejido cicatricial)
INTESTINO
ÚTERO
Lesiones endometriales
ÚTERO
OVARIO
VEJIGA
TROMPA DE FALOPIO COMPRIMIDA
Las adherencias endometriales, formadas por tejido cicatricial, pueden crecer hasta envolver y oprimir órganos. En ocasiones, la obstrucción de un ovario o de una trompa bloquea el paso del óvulo. Este es uno de los mecanismos causantes de esterilidad.
PELVIS
QUISTE ACHOCOLATADO (ENDOMETRIOMA)
El tejido endometrial extraño que se instala en el ovario adquiere a veces la forma de una masa que causa dolor y llega a impedir la liberación de los óvulos.
DAVID CHENEY

tos para estudiar los complicados orígenes de la endometriosis, facilitar su diagnóstico y diseñar tratamientos específicos. Pero en una época en que las mujeres están alzando la voz por una mejor asistencia, todavía son demasiadas las que permanecen sin diagnosticar y sumidas en el dolor.

EL ENIGMA DE LA INVASIÓN

«En primer lugar, ¿cómo escapa el tejido del útero?», se pregunta Linda G. Griffith, profesora de bioingeniería e ingeniería mecánica del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). En calidad de directora científica del Centro de Investigación de Patología Ginecológica del MIT y de paciente con endometriosis, no puede ser mayor su interés por esta cuestión, que lleva décadas desconcertando a sus colegas. Nadie sabe con certeza cómo o por qué aparecen las células endometriales fuera del útero.

La teoría imperante, la de la menstruación retrógrada, data de hace casi un siglo. El ginecólogo John Sampson observó un desplazamiento retrógrado del líquido menstrual por las trompas de Falopio, que arrastra consigo células del útero. Unas gotas de ese líquido se asentarían sobre los órganos pélvicos y la membrana que recubre el interior del abdomen (el peritoneo) o flotarían en el líquido pélvico y se dispersarían a puntos distantes. Esto sucede en casi todas las mujeres, pero normalmente el sistema inmunitario lo elimina. Ahora bien, en ocasiones, según la teoría, las células se implantan allá donde han ido a parar. El tejido fuera de lugar actúa como si estuviera aún en el útero: produce receptores de hormonas y responde a las señales hormonales. Prolifera cada mes igual que el revestimiento (epitelio) uterino, segrega hormonas y se desprende al final del ciclo. Pero, a diferencia de la menstruación, la sangre y el tejido quedan atrapados en la pelvis y desencadenan un proceso inflamatorio. Con el tiempo, la inflamación da lugar a fibrosis y adherencias.

Desde Sampson, los entendidos no se ponen de acuerdo sobre la causa fundamental de la enfermedad. ¿Radica el defecto en la «semilla», las células endometriales díscolas, o en el «sustrato», el medio abdominal donde se implantan y propagan esas células? Las teorías a favor de la semilla culpan a las células endometriales o a células madre defectuosas. Los partidarios del sustrato sostienen que la endometriosis es, en esencia, una alteración inmunitaria. Una tercera teoría plantea un punto medio y afirma que el sustrato modifica la semilla. «Las células endometriales de las mujeres afectadas serían normales hasta que la consolidación de las lesiones derivaría en cambios en el tejido», explica Griffith, por lo que es probable que el iniciador sea la respuesta inmunitaria a las lesiones. La inflamación resultante alteraría la expresión de los receptores de la progesterona y de los estrógenos en las células endometriales; como consecuencia, estas segregarían más estradiol, un estrógeno que fomenta el crecimiento de las lesiones, sin el control ejercido por la progesterona. En un experimento con babuinos en 2006, se logró provocar la endometriosis mediante la inyección de epitelio uterino normal en la cavidad pélvica.

Kevin G. Osteen, profesor de obstetricia y ginecología de la Universidad Vanderbilt, propone la intervención de toxinas ambientales, por lo menos en ciertos casos. Su interés se centra en uno de los contaminantes industriales más tóxicos, las dioxinas y otras sustancias similares como los policlorobifenilos (PCB), presentes en la carne, el pescado, los lácteos y, en cantidades diversas, en el cuerpo de cualquier persona. La teoría de Osteen es que la exposición del útero a esas toxinas altera la fisiología del endometrio en desarrollo. En una serie de experimentos, el tejido endometrial humano que su equipo expuso a las dioxinas adquirió resistencia a la progesterona y mostró propensión a la inflamación. Sin progesterona para contener a las metaloproteinasas de la matriz, enzimas que regulan la restitución del epitelio uterino desprendido cada mes, el tejido endometrial devendría invasivo y se extendería fuera del útero.

Griffith sospecha que lo que le causó la endometriosis tuvo lugar pronto en su vida. No duda de que la menstruación retrógrada pueda ser cierta en muchos casos, pero probablemente no en el suyo, pues sufrió síntomas atroces desde el primer día de su menarquia, mucho antes de que tuvieran tiempo de crecer las lesiones derivadas de la menstruación. Hay quien plantea que las pacientes como ella podrían haber presentado flujo retrógrado de células endometriales durante el sangrado vaginal normal que ocurre a menudo en las neonatas poco después de nacer. O, todavía en el vientre materno, células de tipo endometrial o células madre podrían haberse asentado fuera del útero, a veces en zonas muy distantes, como los pulmones o el cerebro (se han observado estas células errantes en fetos abortados). «Esas células permanecerían allí hasta la pubertad», apunta, como bombas de relojería. Parecida al cáncer, la endometriosis tiene muchas causas y manifestaciones. Como señala Griffith, «probablemente no sea una enfermedad, sino muchas».

DOLENCIA DESATENDIDA

Cuando una mujer habla de la endometriosis, habla de dolor. Relata los días de absentismo escolar o laboral, el tiempo y las oportunidades perdidas, el desinterés por los placeres de la vida. Habla de cómo organiza su calendario alrededor de la regla o de noches con morfina en urgencias. Una de las cosas más difíciles para ella es que el dolor «invade su cabeza».

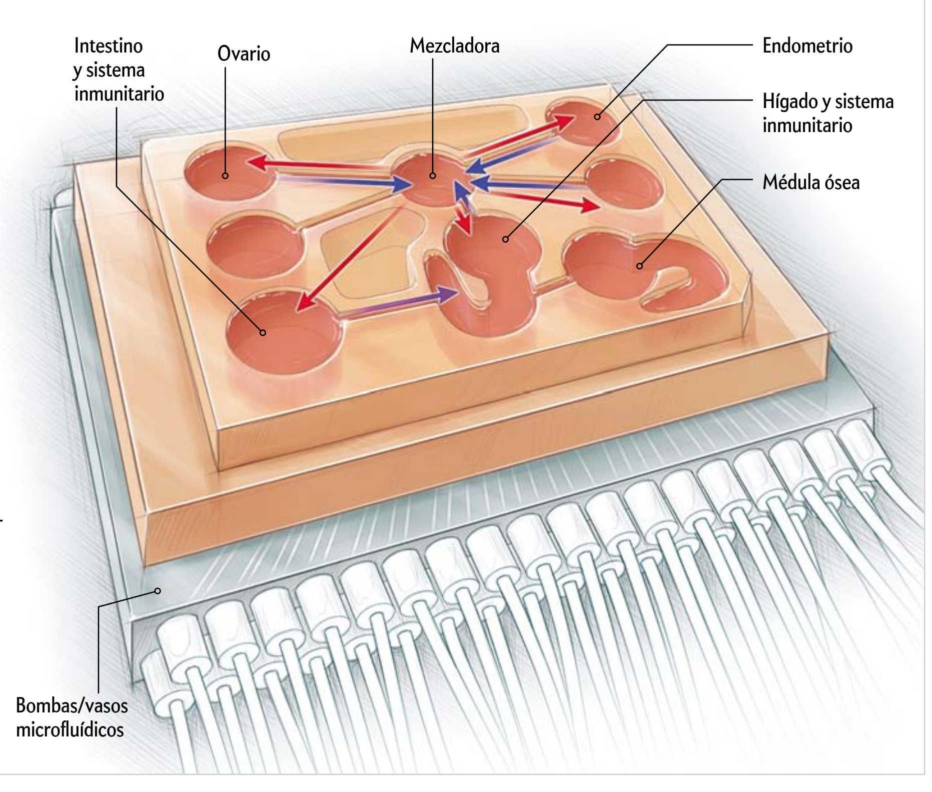
La medicina siempre ha tendido a restar importancia al sufrimiento femenino. En un estudio de 2008 publicado en la revista *Academic Emergency Medicine* se observó que las mujeres esperaban en urgencias más que los varones antes de recibir tratamiento por el mismo dolor abdominal, y que la probabilidad de que recibieran analgésicos opiáceos era entre un 13 y un 25 por ciento menor (después de equiparar factores como la edad, raza, prioridad asistencial y puntuación del dolor). Un estudio precedente con pacientes cardiópatas halló que es más probable que el personal de enfermería administre analgésicos a los varones y sedantes a las mujeres. Y cuando estas reciben analgésicos, corren el riesgo de que sean menos seguros y eficaces, pues muchos estudios del dolor se han realizado con varones o ratones macho.

Después de ser diagnosticada por fin, Emma perdió un ovario por culpa de la endometriosis a los 26 años. Una década después dio a luz una niña y ahora el dolor es mucho más llevadero, pero ha de lamentar los años que pasó con un diagnóstico erróneo y un tratamiento insuficiente. «Si pudiera cambiar el pasado, habría exigido respuestas mucho antes», comenta. Cuando empezaron los dolores ni siquiera sabía que existía la endometriosis. Y parece que los médicos tampoco, según dice.

Uno de los motivos por los que los médicos, e incluso las pacientes, restan importancia al dolor causado por la endometriosis es que se agudiza durante la menstruación, cuando se «supone» que las mujeres se encuentran mal. «El dolor es muy subjetivo. El menstrual es el único que se considera "normal" y resulta difícil saber cuándo deja de serlo», explica Hugh S. Taylor, catedrático de obstetricia, ginecología y ciencias de la reproducción de la Facultad de Medicina de Yale. Taylor añade que los tabúes han impedido hablar sin tapujos del dolor que se siente durante la menstruación, en el curso del acto sexual o al ir de vientre, todos ellos síntomas de alarma de la endometriosis. «Por

Órganos en un chip

Los científicos están diseñando órganos a escala microscópica para evaluar los medicamentos contra la endometriosis. Llamados avatares de órganos en chips, contienen células vivas que pueden ser expuestas a hormonas, fármacos y otros estímulos. Cada plataforma acoge un conjunto de miniórganos relevantes para los procesos de la enfermedad, además de una cámara de mezcla que simula la circulación general. En este ejemplo, el epitelio uterino (endometrio) y el ovario están conectados con el intestino, el hígado y la médula ósea, que intervienen en el metabolismo de los medicamentos y en la respuesta inmunitaria. Esta plataforma PhysioMimetics se está desarrollando en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



DAVID CHENEY

suerte, estas barreras están cayendo», apunta. Tanto los médicos como las pacientes cada vez se encuentran más cómodos a la hora de abordar estos temas e indagar sus causas. Ahora, las pacientes pueden desempeñar un papel más activo en la lucha contra la endometriosis. Por ejemplo, pueden participar en la investigación a través de la aplicación de «ciencia ciudadana» Phendo, que lanzaron hace poco informáticos biomédicos de la Universidad de Columbia. Las usuarias rastrean e identifican sus patrones y desencadenantes; sus datos servirán para estudiar las causas de la enfermedad y diseñar tratamientos.

«Las asociaciones de afectadas por la endometriosis hace décadas que informan y educan a las pacientes», refiere Casey Berna, gestora y miembro de una de estas asociaciones. «Existe ahora un movimiento en contra de los tradicionales enfoques asistenciales paternalistas y en favor de dar voz al paciente, sobre todo ante las enfermedades complejas.»

En abril del año pasado, Berna y sus colaboradoras organizaron una protesta de pacientes a las puertas de la sede del Colegio Estadounidense de Obstetras y Ginecólogos (ACOG, por sus siglas en inglés), en Washington D.C., con el fin de exigir a sus miembros mejor formación para el diagnóstico de la endometriosis y tratamientos más modernos (entre otros aspectos, poner fin a las histerectomías innecesarias). «En pocas palabras. Los tratamientos actuales dejan décadas de secuelas a millones de pacientes. Apelamos al ACOG para que trabaje con las asociaciones de enfermas y con los expertos en endometriosis y utilice todos los recursos a su alcance para hacer frente a esta crisis sanitaria.»

Los expertos creen que son todavía demasiados los facultativos que pasan por alto la dolencia. «Los pediatras y la mayoría de los médicos de cabecera siguen sin recibir formación adecuada sobre la endometriosis», advierte Taylor. Y si no se diagnostica, suele empeorar. «El tejido endometrial que prolifera fuera de su lugar contiene niveles anormalmente altos de aromatasa. Esta enzima hace que predominen los estrógenos en las lesiones, lo que impulsa su crecimiento», explica Pamela Stratton, ginecóloga y cirujana en los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) de EE.UU. Además, las lesiones se vuelven resistentes a la progesterona, que, de no ser así, contribuiría a frenar la proliferación endometrial y combatiría la inflamación. Como resultado, prevalece la inflamación: las prostaglandinas (lípidos cuya formación se acelera con los daños tisulares) y las citocinas (proteínas proinflamatorias) actúan sobre las terminaciones nerviosas e intensifican la sensibilidad al dolor. Con el tiempo se forman adherencias que entorpecen el funcionamiento de los órganos pélvicos y causan más dolor.

Una peculiaridad del dolor endometriósico es que guarda poca relación con la extensión o la localización de las lesiones. Puede ocurrir que alguien con lesiones limitadas se retuerza como si le estuvieran triturando las entrañas en una picadora, mientras que otra en «estadio IV», grave, con abultamientos visibles en el vientre, no sienta nada. La adenomiosis, que aparece cuando el tejido endometrial invade la pared muscular del útero, puede pasar desapercibida, ya que las lesiones son difíciles de ver en el quirófano, mientras la afectada se retuerce de dolor. En muchos casos, este persiste aunque las lesiones hayan menguado o sido extirpadas.

«Llegados a ese punto, ya no es solo un problema de la pelvis, sino un trastorno del sistema nervioso central», explica Stratton. Con excesiva frecuencia, el cerebro lleva tanto tiempo expuesto al dolor endometriósico que es incapaz de abolirlo, aunque el desencadenante haya desaparecido. En esta situación, llamada sensibilización central, las conexiones neuronales se remodelan para estar «alerta ante el daño»: cualquier pequeña alteración, como la ovulación, la menstruación o el coito, desencadena y

cronifica el dolor. «La genética parece desempeñar un papel, pero no se conocen los detalles», añade. «Mujeres con lesiones contadas o pequeñas sufren un dolor crónico, mortificante, que origina sensibilización central.» Por desgracia, estas son quizá las mujeres con más posibilidades de que su médico les diga que no tienen nada, pues muchos ginecólogos desconocen el riesgo de sensibilización central. Stratton asegura que «como no son neurocientíficos, no tienen en cuenta lo que estos han descubierto sobre el dolor».

Esta especialista, que se mueve en ambos campos, investiga tratamientos que mitiguen el dolor y logren revertir la sensibilización central en las afectadas por la endometriosis. Postula que, si un medicamento lo alivia durante un período prolongado, el sistema nervioso central podría restablecer el umbral normal del dolor. Está llevando a cabo un ensayo clínico con la toxina botulínica, más conocida como bótox. Inyectada en el suelo de la pelvis, relaja los espasmos musculares y puede alterar las sustancias que intervienen en la transmisión del dolor. Según dice, algunos facultativos ya la administran como calmante en este contexto, una indicación no autorizada del producto, y ella misma estará en condiciones de saber si funciona a finales de 2019, tras el seguimiento de sus pacientes durante un año.

Hay mucho en juego. El dolor crónico causa insomnio, ansiedad, depresión, irritabilidad y obnubilación. Varios estudios de neuroimagen han revelado alteraciones en la sustancia gris de pacientes con dolor crónico, sobre todo la contracción del volumen del hipocampo (lo que podría explicar el deterioro de la memoria) y de la corteza prefrontal (lo que podría comportar deficiencias en la regulación del dolor y en la función cognitiva). Un pequeño estudio de pacientes con endometriosis y dolor pélvico crónico ha detectado atrofia del tálamo, de la ínsula y de otras regiones asociadas a la modulación del dolor. En un seguimiento de pacientes con dolor de espalda crónico, investigadores de la Universidad del Noroeste equipararon la reducción del volumen de sustancia gris (1,3 centímetros cúbicos cada año) a los efectos de entre 10 y 20 años de envejecimiento natural.

UNA CALAMIDAD PARA LA FECUNDIDAD

Cuando la mujer con endometriosis confiesa sus miedos, la esterilidad suele ser uno de los primeros que saca a relucir. Cerca de la mitad de las mujeres estériles la padecen. Como una broma cruel de la naturaleza para quien anhela concebir, se dice que los dolores de la endometriosis semejan los del parto. La obstrucción de la trompa de Falopio impide en ocasiones el paso del óvulo desde el ovario hasta el útero, y la inflamación desatada por la fibrosis o la extirpación quirúrgica alrededor de los ovarios merma la cantidad y la calidad de los folículos. Las citocinas proinflamatorias y otros elementos del líquido peritoneal que baña los órganos pélvicos reducen la movilidad de los espermatozoides en las trompas y dañan el óvulo y el embrión. Las hormonas también pueden sufrir alteraciones. Si la concepción es una sinfonía hormonal e inmunitaria, en la endometriosis el director de la orquesta ha abandonado la sala. En condiciones normales, tras la ovulación la densidad de los receptores estrogénicos en la pared uterina disminuye como antesala para la implantación. La progesterona se eleva y el epitelio endometrial se apresta para acoger y nutrir el óvulo fecundado. La hormona relaja el útero y suprime las contracciones. (Progesterona deriva de «progestación».) Sin embargo, en la endometriosis, el epitelio uterino no responde bien a ella, por lo que predomina la hormona competidora, el estradiol, junto a otros factores que hacen el entorno menos propicio para el blastocisto. La implantación se puede consumar, pero la resistencia a la progesterona comporta un mayor riesgo de aborto y prematuridad.

A esta complejidad se suman los indicios de que el endometrio posee un microbioma que también resulta alterado por la endometriosis. Estudios recientes indican que en el útero femenino acostumbran a predominar los lactobacilos y que estas bacterias intervienen en la implantación y favorecen el desarrollo del embrión. Todavía es una idea especulativa, pero la inflamación crónica desatada por la endometriosis acabaría con ellas y crearía un desequilibrio microbiano en el útero que perpetuaría la inflamación y la esterilidad sobrevenida. Una investigación preliminar publicada en 2016 en el *American Journal of Obstetrics & Gynecology* observó que, cuando predominan otros microbios distintos de los lactobacilos, como ocurre en la endometriosis, la tasa de implantación apenas alcanza un tercio de la normal y el número de abortos se dispara. La causa de tal relación se ignora, pero estudios como el anterior han alentado la investigación del papel del microbioma uterino en la endometriosis; algunos médicos ya plantean el análisis de cultivos endometriales antes de optar por un tratamiento contra la esterilidad.

Por otra parte, no todo es negativo. Entre el 43 y el 55 por ciento de las pacientes con endometriosis logran concebir tras un ciclo de fecundación in vitro, según el estadio de la enfermedad, y la tasa de nacidos vivos de estas madres es equiparable a la de las que no la sufren. Los cambios hormonales propios del embarazo suelen aplacar los síntomas. Y la lactancia también se asocia con un descenso del riesgo. Este hallazgo de 2017, derivado de un conjunto de datos aportado por más de 70.000 mujeres, indica que, por cada trimestre de lactancia materna en exclusiva, el riesgo para la madre desciende un 14 por ciento, en comparación con menos de un mes de lactancia natural. Queda por saber si la secreción hormonal y los factores inmunitarios vinculados con el amamantamiento pueden aliviar los síntomas de las madres que ya padecían la endometriosis.

MEJORES INSTRUMENTOS Y TRATAMIENTOS

Cuando los expertos hablan de ella, siempre mencionan el escollo de los siete años, que es el plazo medio entre la aparición del dolor y el diagnóstico, un lapso en el que los daños pueden ser cuantiosos. El diagnóstico exige hoy día una intervención quirúrgica (laparoscopia), pero podría ser mucho antes si fuera posible detectarla con un simple análisis de sangre, saliva u orina. La dificultad es dar con la sustancia idónea que analizar.

En estos últimos años, varios laboratorios han centrado su atención en los microARN: secuencias cortas, no codificadoras de proteínas, que regulan la expresión génica y que los tejidos desprenden. En 2016, el grupo de Taylor identificó tres microARN que son más frecuentes en las pacientes con endometriosis. La empresa de Taylor, DotLab, se servirá de ellos como base para la primera prueba diagnóstica de la endometriosis en saliva, cuya exactitud supera el 90 por ciento, según este. A punto de salir al mercado, estará a la venta con receta. Si tiene éxito, las afectadas podrán ser tratadas antes, sostiene su inventor, y, además, servirá para comprobar si los medicamentos recetados son eficaces. A fin de cuentas, el diagnóstico, sea o no precoz, no garantiza el alivio de los síntomas. Algunos medicamentos funcionan al principio y luego pierden eficacia. Otros causan síntomas parecidos a los de la menopausia.

En el futuro, la paciente recién diagnosticada podría iniciar el tratamiento con una biopsia de piel, vaticina Julie Kim, profesora de obstetricia y ginecología en la Universidad del Noroeste.

Células obtenidas de un trocito de piel del muslo o de la cadera se manipularían genéticamente para remontarse en el desarrollo y convertirlas en células madre pluripotentes inducidas, capaces de convertirse en cualquier célula del organismo, endometrial, hepática o renal, por citar algunas. Cada tipo se emplearía para sembrar un «microórgano» en un circuito eléctrico del tamaño de una tableta que representaría el cuerpo de esa persona, en otras palabras, su avatar médico.

Ya disponemos de varios avatares de órganos en chips. El que creó Kim como coinvestigadora se halla en el Laboratorio Woodruff de la Universidad del Noroeste y se llama EVATAR (combinación de «Eva» y «avatar»). Es un aparato reproductor femenino en miniatura, con sus microovarios, trompas de Falopio, útero y cuello uterino, acompañado del hígado. Como otras plataformas de avatares de pacientes, los «órganos» del EVATAR se alojan en recipientes de un par de centímetros de diámetro, situados sobre una placa conectada a un ordenador. Permanecen conectados por microcanales por los que fluye sangre artificial que transporta hormonas, nutrientes y factores de crecimiento e inmunitarios. El EVATAR tiene un ciclo mensual, pero sin sangrado.

Con excesiva frecuencia, el cerebro lleva tanto tiempo expuesto al dolor endometriósico que es incapaz de abolirlo, aunque el desencadenante haya desaparecido

La paciente que dispusiera de un EVATAR sabría los medicamentos que son más adecuados para ella pues, al fin y al cabo, cada microórgano de la plataforma sería portador de su dotación genética. «Supongamos que quisiéramos examinar un medicamento destinado a reducir las lesiones endometriales», propone Kim para describir el tipo de estudio que pretende realizar con el EVATAR. Su laboratorio expondría el sistema al tratamiento experimental. Durante el ciclo menstrual se recogerían y analizarían los datos de cada órgano para averiguar, a escala celular, si es seguro y eficaz para tratar las lesiones de esa paciente. Este tipo de experimento evitaría, además, el problema que suscitan numerosos fármacos y tratamientos, cuyo estudio en varones y animales de sexo masculino hace que no sean tan aplicables a las mujeres y abre la puerta a la medicina personalizada.

El laboratorio de Kim ha demostrado la viabilidad del EVATAR, pero advierte que pasarán hasta cinco años antes de obtener una plataforma con la que someter a prueba los medicamentos contra la endometriosis y más aún antes de poder examinar a las pacientes con ella; los plazos dependerán de los numerosos factores que condicionan la puesta en práctica de cualquier herramienta experimental. «El proyecto solo prosperará si se dispone de los fondos necesarios y se da prioridad a la investigación de la endometriosis», asegura.

En opinión de Griffith, el coste del examen personalizado de los medicamentos en avatares de pacientes resulta prohibitivo, pero los órganos en chips prometen ser útiles para desentrañar la endometriosis. En lugar de una plataforma de órganos en un chip para cada paciente, espera clasificar a las afectadas según diversos marcadores moleculares, a semejanza del método empleado en el cáncer de mama, para luego desarrollar medicamentos dirigidos a cada tipo. «Cada paciente es distinta», comenta, «pero pensamos que existen grupos con características comunes». Explica que el primer paso para dar con esos grupos consiste en elaborar modelos informáticos de la enfermedad y unos pocos esquemas de clasificación hipotéticos. A continuación, habrá que reclutar a cientos de pacientes en varios centros sanitarios para evaluar con ellas los modelos. Prevé que surgirán de tres a cinco grupos con diversos tipos de alteración, con unas características moleculares distintivas.

PhysioMimetics, la plataforma de órganos en chips de Griffith, conecta hasta 10 sistemas de miniórganos en un circuito integrado, entre ellos un endometrio en miniatura diseñado por Christi Cook, antigua doctoranda de su laboratorio. El endometrio del chip consiste en un soporte polimérico de hidrogel que sustenta varias capas de tipos celulares del tejido endometrial. Se pueden aplicar diversos estímulos hormonales e inflamatorios a los tejidos y ver qué sucede.

Una vez que haya identificado sus grupos, cada uno con sus propios marcadores moleculares de la enfermedad, Griffith prevé asociarse con laboratorios farmacéuticos para examinar medicamentos dirigidos a las vías patológicas específicas de cada grupo en la plataforma de órganos en chip. Si los avatares indican que el medicamento es seguro y eficaz, lo someterá a prueba en pacientes reales.

Pese a los alentadores órganos en chips y otros ingenios, queda un largo camino para poner remedio a la endometriosis. La financiación destinada a su investigación sigue siendo insuficiente para el coste social que comporta: 62.000 millones de dólares al año en Estados Unidos, suma de la pérdida de productividad laboral y los costes directos de la asistencia sanitaria, según un estudio de 2012 de la Fundación Mundial para la Investigación de la Endometriosis. Un informe de los NIH revela que en ese país se habrán invertido en 2018 cerca de mil millones en la investigación sobre la diabetes, en comparación con siete millones para la endometriosis, que afecta a un porcentaje de mujeres semejante. «Si buscas en PubMed», el archivo de estudios biomédicos de Internet, asegura la investigadora, «hallarás más de 20.000 artículos sobre la disfunción eréctil, pero solo unos 2000 sobre la adenomiosis, que se calcula que es igual de frecuente que la endometriosis. ¿Quién falta al trabajo por la primera?»

Por suerte, opina que al talento le atrae este campo porque resulta «fascinante desde el punto de vista científico», aparte de ser crucial para la sociedad. A fin de cuentas, aún no tiene cura. El mayor logro alcanzado es la eliminación quirúrgica de la enfermedad, a lo que Emma añadiría: «Y la eliminación subjetiva del dolor». Cuando desaparece el dolor crónico, sana la mente. La sustancia gris puede volver a aumentar y lo hace. Pero como la hiedra invasora, la endometriosis es difícil de dominar; vencerla exigirá el esfuerzo concertado de investigadores y médicos, así como un verdadero compromiso económico de la sociedad, dispuesta por fin a tomarse en serio este mal. IyC

PARA SABER MÁS

Aplicación Phendo de la Universidad de Columbia, concebida para registrar y supervisar los síntomas de la endometriosis (en inglés): **http://citizenendo.org/phendo**

Test en saliva para la endometriosis, de DotLab: **www.dotlab.com**

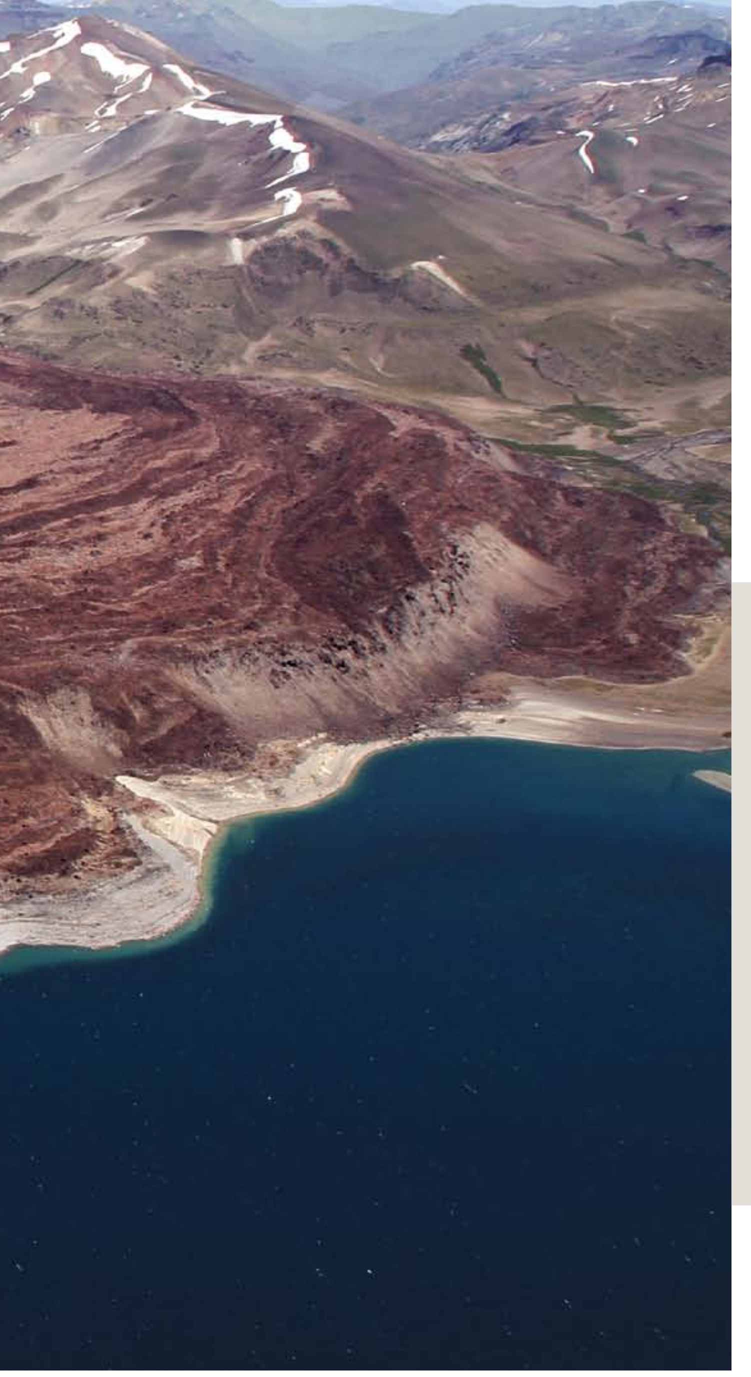
EN NUESTRO ARCHIVO

Una medicina adaptada a las mujeres. Marcia L. Stephanick en *IyC*, noviembre de 2017.



LA LAGUNA DEL MAULE, en Chile, está rodeada de campos de riolita (*centro*) emitida en antiguas erupciones volcánicas.

INFIERNO OCULTO



GEOLOGÍA

Bajo la superficie de Chile podría estar gestándose un supervolcán. Su interior frío está trastocando nuestras ideas sobre cómo se desencadenan las mayores erupciones del planeta

Shannon Hall

El helicóptero daba violentos bandazos en el aire gélido, a centenares de metros sobre los Andes chilenos. Cada vez que se ladeaba al girar, el aparato descendía veinte metros y los escarpados picos parecían precipitarse sobre Brad Singer a través del lateral abierto (habían retirado la puerta para facilitar la labor fotográfica). Las sacudidas y el camino expedito hasta el suelo no ayudaban a que Singer, geólogo de la Universidad de Wisconsin-Madison acostumbrado a trabajar en tierra firme, se sintiera muy seguro pese al cinturón que lo amarraba al asiento. «Era como estar en una montaña rusa gigante y ruidosa», rememora.

Sin embargo, el impresionante panorama que se extendía a sus pies, con los vestigios de una dilatada historia volcánica, lo distrajo de sus preocupaciones sobre una posible caída. Singer y sus colaboradores sobrevolaban un campo de lava de color rosa claro que ocupaba 20 kilómetros cuadrados de aquel paisaje inhóspito, un área que podría alojar fácilmente 25 cráteres como el de la cumbre del Kilauea. Y eso era solo una parte de lo que el geólogo había ido a ver. La región volcánica de la laguna del Maule alberga unos 50 campos de lava y 70 depósitos de cenizas que bordean un lago azulado de 54 kilómetros cuadrados. Según Singer, que ha explorado la zona durante los últimos veinte años, la inmensa escala de la región solo puede apreciarse a vista de pájaro. Es la única forma de asimilar que la zona de la laguna del Maule posee la mayor colección del mundo de riolita (una roca que, en forma de magma líquido, puede ser especialmente explosiva y peligrosa) expulsada en erupciones recientes.

Los geólogos creen que las coladas y los depósitos han sido producidos por 25 o 30 volcanes a lo largo de los últimos 20.000 años. Ese registro se asemeja misteriosamente al de Long Valley, en California, donde, además de un aluvión de lo que Singer denomina explosiones «habituales», un enorme volcán creó una depresión de 500 kilómetros cuadrados hace unos 765.000 años. Esta similitud geológica y el inquietante abultamiento del terreno que comenzó a observarse en la laguna del Maule hace aproximadamente una década sugieren que la región podría convertirse en el próximo supervolcán.

Los supervolcanes son una de las fuerzas más destructivas del planeta. Cada una de sus erupciones arroja al menos 1000 kilómetros cúbicos de roca y ceniza, 2500 veces más material que la devastadora explosión del monte Santa Elena en 1980. Los mapas de la cámara magmática subterránea de la laguna del Maule indican que ha crecido lo suficiente como para poder expulsar esa cantidad de material en un solo episodio eruptivo. Aun si libera parte de su vapor en una serie de erupciones menores, el sistema de la laguna del Maule parece constituir un buen modelo de los antiguos gigantes.

Además, presenta una característica clave que no posee ningún otro supervolcán: se está formando ante nuestros ojos. Hasta ahora, los geólogos han deducido todo lo que saben acerca de estos colosos a partir de rocas antiguas, depósitos de ceniza y otras secuelas, una labor forense que les permite reconstruir algunos aspectos de las explosiones. Pero la región de la laguna del Maule se está despertando ahora, brindándonos la primera oportunidad de observar en directo la evolución de estas catástrofes. «Nunca hemos presenciado la enorme erupción de un supervolcán», explica Singer. Esa perspectiva es motivo de preocupación para los varios cientos de miles de habitantes de las poblaciones cercanas. Si bien no parece probable que se produzca una supererupción a corto plazo, algunas instituciones públicas de Argentina y Chile están vigilando la zona.

Shannon Hall es una galardonada periodista científica especializada en textos de astronomía, geología y ecología.



Ese escrutinio de la laguna del Maule, sumado a los hallazgos sobre antiguos supervolcanes, ha llevado a los científicos a una conclusión sorprendente: las enormes cámaras magmáticas subterráneas que alimentan a estos colosos no son los calientes tanques de lava fundida que se habían imaginado, sino que la masa está tan fría que a menudo se encuentra en estado sólido. El descubrimiento plantea un interrogante a los vulcanólogos: para que se produzca una erupción, el magma sólido tiene que fundirse y ascender rápidamente, en cuestión de decenios, así que es necesario explicar cómo se produce este cambio súbito de un material frío a uno supercaliente.

En fecha reciente, Singer y algunos de sus colegas han hallado indicios de que ese reservorio de magma frío podría sufrir la sacudida repentina de burbujas de agua calientes procedentes de los niveles inferiores. En otros volcanes, parece que el magma de una cámara caliente irrumpe en otra más fría situada encima. Mientras los investigadores tratan de encajar estas piezas, las observaciones en tiempo real de la laguna del Maule podrían ayudarlos a explicar las mayores explosiones de nuestro planeta.

FUERZAS CRECIENTES

Los antiguos supervolcanes desataron fuerzas descomunales. Por ejemplo, hace unos 631.000 años explotó uno en lo que hoy es el Parque Nacional de Yellowstone, en EE.UU., generando oleadas letales de gases calientes, rocas volcánicas, ceniza y niebla tóxica. Esas erupciones inundaron valles enteros con un material tan caliente y pesado que, al soldarse, formó riscos que hoy alcanzan 200 metros de altura. Más tarde, la ceniza oscureció el cielo y fue depositándose sobre una extensa región de Norteamérica, cubriendo con una capa de restos un triángulo que va desde la actual frontera entre Canadá y EE.UU. hasta California y el golfo de México. En ocasiones, los efectos de un supervolcán pueden sentirse en todo el mundo: algunos produjeron capas de ceniza tan gruesas que los científicos creen que bloquearon la luz del sol y sumieron al planeta en un invierno volcánico.

En la historia moderna no ha entrado en erupción ningún supervolcán. Pero en 2008, Matthew Pritchard, geofísico de la Universidad Cornell, detectó una señal surrealista procedente de los Andes chilenos al analizar datos de satélite: la pantalla de su ordenador mostraba un patrón psicodélico en forma de diana. La forma anular es habitual cuando hay variaciones

EN SÍNTESIS

Los supervolcanes acumulan fuerzas destructivas de enorme magnitud y sus explosiones son tan grandes como para remodelar los continentes. La humanidad nunca ha presenciado una erupción de este tipo.

En la laguna del Maule, en los Andes, se está gestando un sistema volcánico que podría alcanzar las dimensiones de un supervolcán a lo largo de nuestras vidas. Su reservorio de magma es ya lo bastante grande y las erupciones pasadas sugieren que podría desatar fuerzas descomunales.

Sorprendentemente, esas explosiones gigantes no comienzan con roca fundida supercaliente, sino con masas prácticamente sólidas. Los científicos investigan los mecanismos que pueden transformar estas masas en cuestión de decenios.

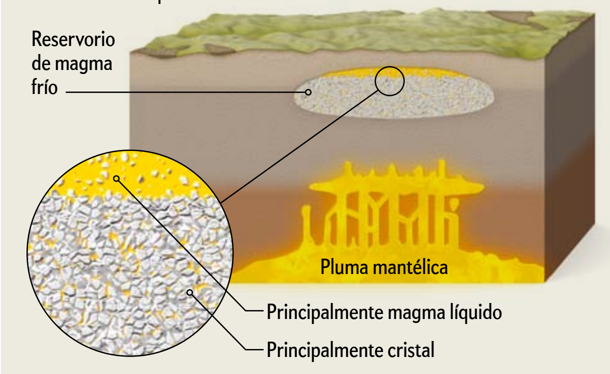
PÁGINAS ANTERIORES: ANGIE DIEFENBACH; SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

Así estalla un supervolcán

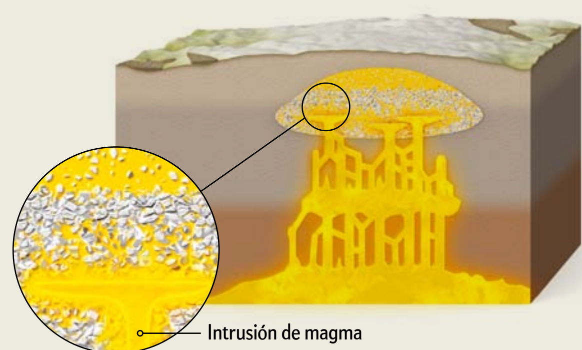
Los mayores volcanes del planeta no se alimentan constantemente de calderas hirvientes de magma. Nuevos hallazgos indican que poseen núcleos relativamente fríos de roca casi sólida. Según los científicos, hay dos mecanismos que podrían calentar rápidamente esa roca hasta causar una explosión.

PLUMA ASCENDENTE

1. Algunos supervolcanes, como el mastodonte situado bajo Yellowstone, en el oeste de EE.UU., se encuentran sobre una «pluma» o columna de magma ascendente. Cerca de la superficie poseen un reservorio más frío, mayoritariamente cristalino y con una pequeña fracción de líquido caliente.



2. El material fundido de la pluma asciende lentamente a lo largo de miles de años y calienta el reservorio superior cuando alcanza la cámara.

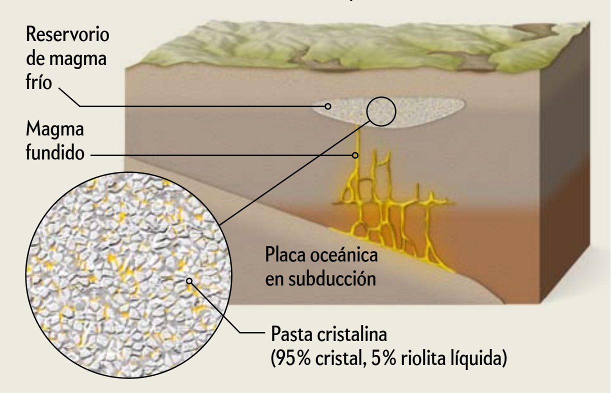


3. Los cristales calientes se funden con rapidez, posiblemente en cuestión de decenios, y forman una masa explosiva que es arrojada a la superficie en una enorme erupción.

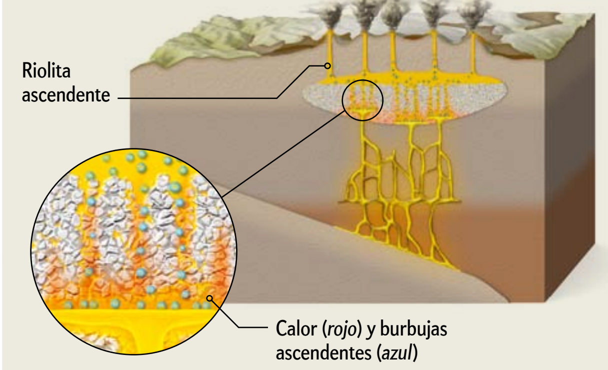
50% líquido

EXPLOSIÓN DE BURBUJAS

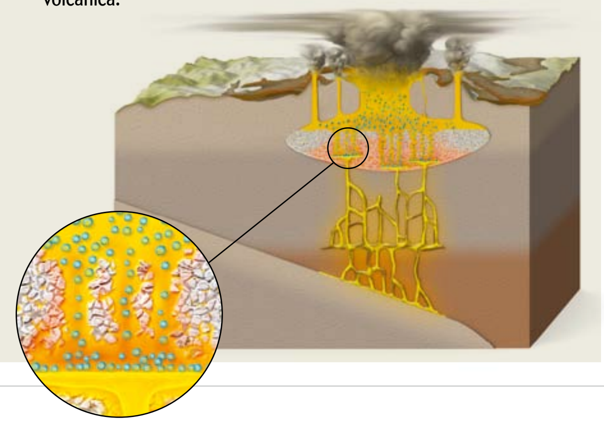
1. Las regiones volcánicas como la de la laguna del Maule, en Chile, se encuentran sobre dos placas tectónicas que chocan entre sí; ello genera magma caliente en las profundidades. Por encima aguarda un reservorio de masa cristalina con una roca fundida pegajosa llamada riolita.



2. El magma alcanza el reservorio y el calor funde los cristales. A medida que el fundido sube en la cámara, libera fluidos volátiles, sobre todo en forma de burbujas de agua. En cuestión de decenios, el calor y las burbujas ascendentes pueden empujar la riolita líquida hacia el exterior, produciendo pequeñas erupciones.



3. Las burbujas se acumulan cerca de la parte superior del reservorio y hacen que penetre más riolita en las fracturas de las rocas. Conforme el fundido asciende, su presión disminuye y las burbujas se expanden rápidamente, lo cual puede generar explosiones de magnitud supervolcánica.



EMILY COOPER

en la elevación del terreno. Lo extraño era que los anillos se centraban en una extensa región de colinas y mesetas de unos 400 kilómetros cuadrados, cuando normalmente se observan en la cima de los volcanes. Estaba ocurriendo algo inusual. A partir de imágenes anteriores, Pritchard determinó que el terreno, que debió comenzar a elevarse entre 2004 y 2007, subía unos 20 centímetros al año. Se trata de la mayor tasa de variación del nivel del suelo registrada en el planeta, 10 veces mayor que el ascenso «acentuado» que se ha producido (y después detenido) varias veces en Yellowstone en los últimos años.

El desplazamiento observado en la laguna del Maule, sumado al historial de explosiones de la zona, ha atraído a varias expediciones para tratar de determinar si realmente se avecina una erupción y, de ser así, cuán grande podría ser. En 2013, Singer inició un proyecto de cinco años dedicado a estudiar el pasado del sistema y su estado actual. En colaboración con el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, él y su equipo instalaron unos 50 sensores en el terreno, sobrevolaron el lago con helicópteros que transportaban instrumentos para examinar la superficie y tomaron muestras de rocas antiguas para analizarlas en el laboratorio.

Todos los datos indicaban que bajo la superficie se gestaba un fenómeno de grandes dimensiones. «No quiero ser alarmista, pero todo apunta a que se está acumulando una gran cantidad de magma bajo la laguna del Maule», afirma Judith Fierstein, geóloga del Observatorio Vulcanológico de California en Menlo Park, un centro del Servicio Geológico de Estados Unidos. La información sobre las estructuras subterráneas (determinada a partir del modo en que se propagan las vibraciones) y los cambios en la gravedad y conductividad eléctrica causados por diferentes tipos de roca revelan que la región se encuentra sobre un reservorio con 450 kilómetros cúbicos de magma riolítico explosivo. Según Singer, si estallase todo ese magma, podría transformarse en los 1000 kilómetros cúbicos de ceniza, roca y lava necesarios para alcanzar la categoría de supervolcán.

Pero no hace falta que explote todo el magma para que resulte peligroso: el 10 por ciento de ese volumen generaría una explosión unas dos veces mayor que la del Krakatoa, que, sin ser un supervolcán, acabó con la vida de 36.000 personas en Indonesia en 1883 [*véase* «La erupción de Krakatoa», por Peter Francis y Stephen Self; Investigación y Ciencia, enero de 1984].

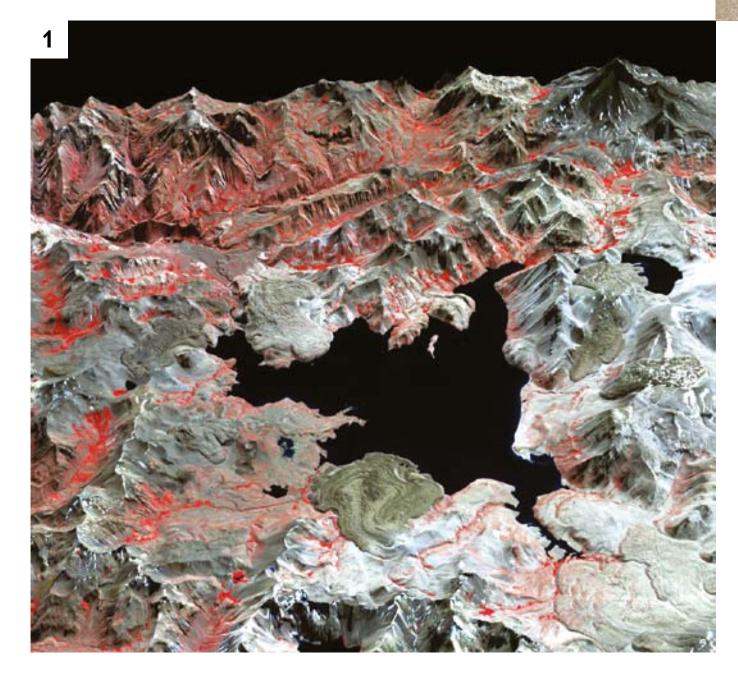
UN FRÍO ASESINO

Mientras algunos científicos medían el tamaño del complejo volcánico de la laguna del Maule, a otros les preocupaba más su temperatura. Según la concepción clásica, el magma almacenado bajo un volcán activo es una masa líquida hirviente que, en un momento dado, asciende hacia la superficie terrestre como una burbuja en una lámpara de lava. Pero en 2014, Adam Kent, de la Universidad Estatal de Oregón, y Kari Cooper, de la Universidad de California en Davis, realizaron un asombroso descubrimiento que ha llevado a muchos investigadores a pensar que algunos volcanes podrían tener un interior frío.

Kent y Cooper examinaron los pequeños cristales contenidos en las rocas volcánicas liberadas en explosiones anteriores del monte Hood, en Oregón. Dichos cristales crecen en la cámara magmática subterránea, acumulando sucesivas capas que, como los anillos de un árbol, registran la evolución química del magma, incluidos los cambios en su composición, presión y temperatura. Por ejemplo, los cristales de las rocas del monte Hood indicaban que su magma pasó el 99 por ciento del tiempo a temperaturas demasiado frías para producir una erupción. No era realmente un líquido, sino una especie de «pasta»: un entramado de cristales con una pequeña fracción de fluido intersticial. «Pasa como con la mantequilla: cuando la sacas del frigorífico y tratas de untarla, está demasiado sólida», señala Kent.

Los científicos se preguntaron si podría ocurrir lo mismo en otros volcanes, y parece que la respuesta es afirmativa. En 2017, Cooper y sus colaboradores llevaron a cabo el mismo análisis con cristales expulsados previamente en la zona volcánica de Taupo, una región de la isla Norte de Nueva Zelanda que ha sido testigo de varias supererupciones, y hallaron que esos cristales también habían pasado la mayor parte de su vida en un magma sólido y frío. Y a finales de 2017, Singer y su equipo analizaron los restos volcánicos de la supererupción de Long Valley, en California, y llegaron a una conclusión similar. La cámara magmática de Yellowstone también contiene una pasta cristalina fría.

Aunque Kent y Cooper han observado indicios de que el magma podría encontrarse a temperaturas ligeramente mayores



NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS Y EQUIPO CIENTÍFICO DE ASTER EN EE.UU. Y JAPÓN

en algunos antiguos emplazamientos de América del Norte y del Sur, comienza a estar muy claro que, en general, los supervolcanes tienden a ser fríos: el magma caliente es efímero y no se genera hasta inmediatamente antes de la explosión. El trabajo de Cooper en Taupo sugiere que estos sistemas se licuan tan solo 40 años antes de la erupción. En Long Valley, la licuefacción tuvo lugar durante decenas o cientos de años. En Yellowstone también se produjo en cuestión de decenios. Y, según Cooper, estas escalas de tiempo podrían ser incluso de unos pocos años, ya que los científicos tienden a publicar estimaciones prudentes.

En la laguna del Maule, el enorme cuerpo magmático también parece consistir en una pasta cristalina. Singer y sus colaboradores sostienen que el 95 por ciento del sistema está compuesto por cristales y solo el 5 por ciento corresponde a un fundido líquido. La pasta también está a temperaturas relativamente frías, de unos 800 grados Celsius. Por el contrario, la lava que fluyó por las laderas del Kilauea, Hawái, en verano de 2018 se encontraba a unos 1200 grados. Los hallazgos también refuerzan la idea de



LAS IMÁGENES DE SATÉLITE de la zona volcánica alrededor de la laguna del Maule (*1*) muestran vegetación (*rojo*) y cumbres nevadas (*blanco*). Unos geólogos instalan sensores cerca del lago para detectar elevaciones del terreno (*2*).

que estas bestias de corazón frío se despiertan en un instante: Nathan Andersen, geólogo de la Universidad de Oregón, analizó los pequeños cristales incluidos en las antiguas coladas de lava de la laguna del Maule y comprobó que solo habían pasado en el magma entre 10 y 100 años.

DESPERTAR A UN GIGANTE

Pero esta idea plantea un enigma: ¿cómo logran esos sistemas congelados fundirse y ponerse en marcha tan rápido? Christy Till, geóloga de la Universidad Estatal de Arizona, sostiene que la última supererupción de Yellowstone se produjo cuando el magma líquido ascendió a través de la tierra y alcanzó un reservorio superior solidificado. Aunque su modelo solo proporciona una visión general —por aquel entonces no había científicos con sensores—, los restos volcánicos parecen indicar que el líquido ascendente se mezcló con el material más sólido y fundió los cristales. Eso calentó toda la cámara, y el volumen del líquido inyectado fue elevando la presión hasta prorrumpir a la superficie.

Sin embargo, en Chile podría estar ocurriendo algo muy distinto. «No existe un modelo universal para estos volcanes», apunta Till. Por ejemplo, Yellowstone se encuentra sobre una «pluma» o columna caliente, mientras que en la laguna del Maule y Long Valley una placa litosférica se hunde bajo otra, lo cual funde la roca y la convierte en magma. Según Andersen, eso da lugar a otro tipo de mecanismo eruptivo que calienta solo parte del reservorio volcánico y conlleva una explosión de burbujas.

Cuando Andersen analizó los cristales de las antiguas erupciones de la laguna del Maule, descubrió que el magma basáltico originado en las profundidades del planeta no se había infiltrado completamente en el sistema volcánico, sino que se había quedado en la base del reservorio superior, rico en riolita. Los dos tipos de roca nunca llegaron a mezclarse. El basalto estancado se enfrió y transmitió calor al material suprayacente y también liberó vapor de agua volátil en forma de burbujas. Eso fundió algunos de los cristales circundantes y generó plumas ascendentes llenas de burbujas que percolaban hacia la parte de arriba del reservorio. Allí ejercieron tanta presión sobre la corteza que acabaron produciendo una explosión.

Esta idea le preocupa a Singer. Si hay burbujas volátiles ascendiendo bajo la laguna del Maule, no tienen forma de escapar. En las proximidades del lago no existen géiseres como el de Old Faithful en Yellowstone, ni tampoco fumarolas, respiraderos o fuentes hidrotermales. «A mi juicio, eso hace que el de la laguna del Maule sea más peligroso que otros sistemas», advierte Singer. Si parte de los gases lograran filtrarse hasta la superficie, el crecimiento del reservorio se ralentizaría. «Pero con un reservorio que está atrapado e incubándose en el subsuelo, el sistema podría aumentar enormemente de tamaño, como hizo Yellowstone antes de su última gran explosión», prosigue Singer. «Y eso supondría un punto de inflexión, el tipo de erupción que nunca hemos presenciado.»

Así que, aunque el reservorio bajo la laguna del Maule apenas alcanza dimensiones supervolcánicas, podría continuar creciendo en siglos venideros. De momento, los temores de Singer son un tanto especulativos, al igual que los mecanismos de erupción. Por ejemplo, podría ser que el fundido ascendente y rico en burbujas no lograra generar por sí solo la presión suficiente para producir una enorme explosión y requiriera la ayuda de un terremoto local. Actualmente, el equipo de Singer trata de identificar señales asociadas a esos posibles detonantes complementarios.

Aun si en la laguna del Maule se produjeran una serie de erupciones menores (algo que ya ha ocurrido en el pasado, de acuerdo con el registro de ceniza y lava en la superficie), sus efectos podrían sentirse en toda Sudamérica. La ceniza paralizaría el tráfico aéreo en la zona y podría devastar durante años la producción agrícola en Argentina (donde probablemente se depositaría, debido a los vientos del oeste). Además, los flujos de ceniza podrían romper una presa en el cercano río Maule y causar inundaciones catastróficas que afectasen a Talca, una ciudad de 200.000 habitantes ubicada en el fondo del valle.

Aunque el equipo de Singer ya ha retirado sus instrumentos, otros científicos de Chile y Argentina han tomado el relevo y han instalado nuevos monitores para vigilar el lago. De momento, la región continúa elevándose. Ese movimiento parece relativamente inofensivo, pero si el lago mostrara signos de agitación, los investigadores podrían ser capaces de predecir con exactitud la próxima erupción del sistema volcánico, ahora que comprenden mejor la chispa que puede despertar a estas bestias congeladas. IyC

PARA SABER MÁS

Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage. Kari M. Cooper y Adam J. R. Kent en *Nature*, vol. 506, págs. 480-483, febrero de 2014.
Rapid cooling and cold storage in a silicic magma reservoir recorded in individual crystals. Allison E. Rubin et al. en *Science*, vol. 356, págs. 1154-1156, junio de 2017.
Incremental heating of Bishop Tuff sanidine reveals preeruptive radiogenic Ar and rapid remobilization from cold storage. Nathan L. Andersen et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, n.º 47, págs. 12407-12412, noviembre de 2017.
Petrochronologic perspective on rhyolite volcano unrest at Laguna del Maule, Chile. Nathan L. Andersen et al. en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 493, págs. 57-70, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Supervolcanes. Ilya N. Bindeman en *IyC*, agosto de 2006.
La próxima gran explosión. Steve Olson en *IyC*, septiembre de 2018.

BRAD S. SINGER, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Newton, Halley y los *Principia*

Sobre los obstáculos que debió superar la publicación de una de las obras maestras de la ciencia

José Manuel Sánchez Ron

SEGURAMENTE NO EXISTE LIBRO MÁS IMPORTANTE EN LA HISTORIA DE LA CIENCIA QUE *PHILOSOPHIAE naturalis principia mathematica* («Principios matemáticos de la filosofía natural», 1687), de Isaac Newton (1642-1727). En esta obra, escrita en latín, se introducían las tres leyes del movimiento: la de la inercia; la que dice que fuerza es igual a masa por aceleración, y la de acción y reacción. Además, en el Libro Tercero, el del «Sistema del mundo», se explicaba, a través de la gravitación universal (representada en la ley del inverso del cuadrado de la distancia), cómo caen los cuerpos en la Tierra y se mueven los cuerpos celestes. Estos contenidos, así como la transcendencia de la obra, son bien conocidos; en cambio, lo es menos el curso que llevó a su publicación. Sobre este proceso arrojan luz las cartas que Newton intercambió con Edmund Halley (1665-1742), quien actuó como lo que hoy podríamos denominar «editor»; un editor sabio y generoso.

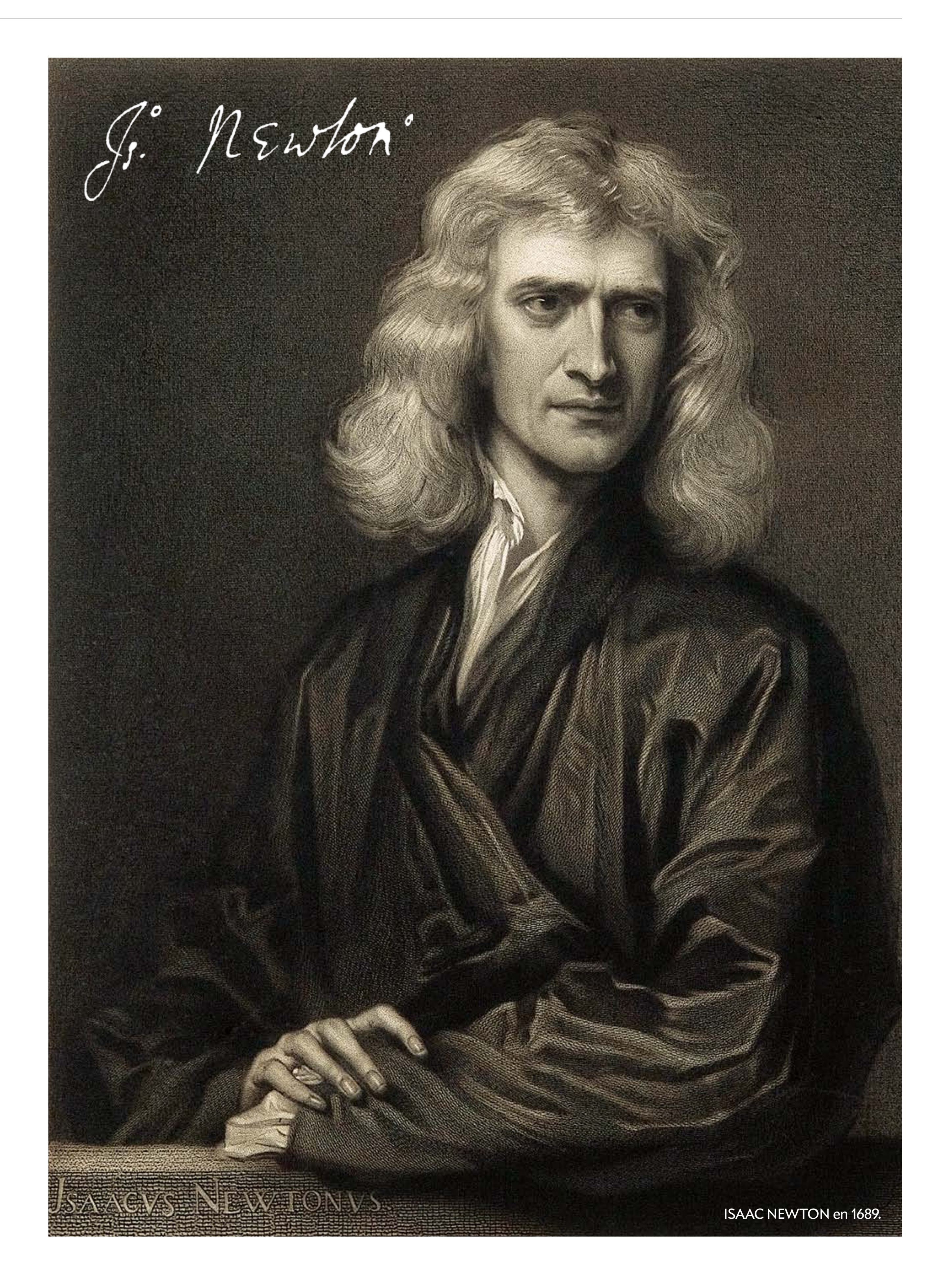
GRABADO DE T. O. BARLOW (1868) A PARTIR DE UNA PINTURA DE SIR G. KNELLER (1689). COLECCIÓN WELLCOME/CC BY 4.0

Halley y *De motu*

Recordado hoy sobre todo por dar nombre a un célebre cometa (fue en uno de sus libros, *Astronomiae cometicae sinopsis*, publicado en 1705, donde predijo, a partir de la teoría gravitacional de Newton, que el cometa que había sido visto en 1682 volvería a hacerse visible en la Navidad de 1758), en la época que ahora nos interesa Halley dirigía la publicación de las *Philosophical Transactions*, la revista de la Real Sociedad londinense. Hasta 1704 no consiguió un puesto más distinguido (y remunerado): profesor saviliano de geometría en la Universidad de Oxford. En 1713 se convirtió en Secretario de la Real Sociedad y en 1721, tras la muerte de John Flamsteed, en Astrónomo Real.

La historia a la que me voy a referir comenzó con una reunión que tuvo lugar en enero de 1684 en la sede londinense de la Real Sociedad. Allí se encontraron Halley, Robert Hooke y Christopher Wren, arquitecto, filósofo de la naturaleza y eminente científico (además de miembro de la Real Sociedad y su presidente de 1680 a 1682, fue catedrático de astronomía en el Colegio Gresham de Londres de 1657 a 1661 y profesor saviliano de astronomía en Oxford de 1661 a 1673). En un momento determinado, la conversación giró en torno al problema del movimiento planetario. Wren terminó ofreciendo un premio de un libro valorado en 40 chelines a quien pudiese deducir la forma de las órbitas planetarias, suponiendo que la fuerza de atracción ejercida por el Sol fuese inversa al cuadrado de la distancia y proporcional al producto de las masas.

Esa fue la pregunta que Halley planteó a Newton cuando le visitó en Cambridge en agosto. La respuesta del profesor lucasiano fue inmediata: una elipse (como había sostenido Kepler). Preguntado como lo sabía, contestó que lo había calculado hacía tiempo. Buscó los papeles correspondientes, pero no los encontró. Prometió a Halley que reharía los cálculos y se los haría llegar. En parte, cumplió su promesa, ya que en noviembre le envió un manuscrito que contenía la demostración. También en noviembre, Halley visitó a Newton en Cambridge y el 10 de diciembre anunciaba en la Real Sociedad que este le había en-



ISAAC NEWTON en 1689.

señado «un curioso tratado, *De motu* [*Sobre el movimiento*]». El 23 de febrero de 1685 el manuscrito en cuestión era entregado a la Sociedad, donde fue registrado de forma conveniente.

De motu es un tratado breve, muy lejos de los *Principia*. En él no aparece, por ejemplo, la ley de la acción y la reacción, sin la cual no puede haber gravitación universal (para que exista hay que suponer que no es solo el Sol el que ejerce una fuerza gravitacional sobre los planetas, sino que estos también actúan sobre él, y en esto consiste, precisamente, la acción y reacción). Ahora bien, por breve e incompleto que fuese, *De motu* muestra que la mente de Newton había entrado en funcionamiento y que el problema del movimiento de los cuerpos, incluido el de los cuerpos sobre los que actuaba la gravitación (problema acerca del cual había pensado intermitentemente en el pasado), pasaba al centro de sus intereses. Sin embargo, parece que no hubo más noticias sobre el particular hasta más de un año después.

En la reunión ordinaria de la Real Sociedad del 28 de abril de 1686, Nathaniel Vincent, miembro de la Sociedad y miembro honorario sénior del Colegio Clare de Cambridge, presentaba a la Sociedad un manuscrito de lo que se suponía sería la primera parte de un libro que llevaba como título *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Se ordenó que se escribiese a Newton una carta de agradecimiento y que el Consejo informase acerca de la conveniencia de editar la obra, para lo cual se pasaba el manuscrito a Halley, quien debía informar al Consejo. Con el informe favorable de este, la Real Sociedad decidió «que la *Philosophiae naturalis principia pathematica* del Sr. Newton se imprima en cuarto, con una letra bonita; y que se le escriba una carta transmitiéndole la resolución de la Sociedad y solicitando su opinión acerca del volumen, grabados, etcétera».

Preparación y publicación

La oferta de costear la edición era generosa, pero la situación económica de la Sociedad no permitía cumplir con semejante deseo. Y fue en Halley en quien recayó la carga. Es cierto que su familia era rica, pero hay que tener en cuenta que su padre había fallecido en 1684 y que en 1686 Halley ya tenía una familia a su cargo y ningún ingreso fijo (la Real Sociedad le pagaba en libros, no en libras), de manera que su situación financiera no era tan buena como en el pasado. Con todo, aceptó el compromiso; el económico y el editorial, porque también estuvo a su cargo supervisar la edición.

Es posible seguir ese proceso editorial a través de las cartas reproducidas en el segundo de los siete volúmenes de la magnífica edición de la correspondencia newtoniana, publicado por Cambridge University Press en 1960 bajo la dirección de Herbert Westren Turnbull: *The correspondence of Isaac Newton*, que cubre el período entre 1676 y 1687.

El 22 de mayo de 1686, desde Londres, Halley escribía a Newton, informándole de la decisión de la Sociedad:

Su incomparable tratado titulado Philosophiae naturalis principia mathematica *fue presentado por el Dr. [Nathaniel] Vincent a la R. Sociedad el pasado 28 [de abril], y fueron tan sensibles al gran honor que les hace con su dedicatoria que inmediatamente ordenaron que se le agradezca de todo corazón, y que un consejo se debería reunir para deliberar acerca de su impresión; pero debido a que el presidente se encuentra con el Rey y a la ausencia de nuestros vicepresidentes, a los que el buen tiempo ha llevado fuera de la ciudad, no ha tenido lugar ningún consejo auténtico para resolver este asunto: de manera que el último miércoles la Sociedad, en su reunión, juzgando que la publicación de tan excelente trabajo no debería sufrir más retraso, resolvió imprimirlo a su propia costa, en cuarto grande, con una letra bella; y que esta su resolución debería serle transmitida a usted pidiéndole su opinión, y que todo debe ser hecho a toda velocidad. Yo estoy encargado de controlar su publicación y me ocuparé de que todo sea realizado lo mejor posible, solamente necesitaré sus instrucciones acerca de lo que crea necesario para su mejor presentación...*

A continuación, Halley se refería a una cuestión que Robert Hooke había sacado a colación: su pretensión de haber sido él el inventor de «la regla de la disminución de la gravedad». Previendo una reacción airada de Newton —que ya había tenido en el pasado un enfrentamiento similar con Hooke en relación con sus trabajos en óptica—, Halley escribía: «Debo pedirle perdón por ser yo quien le envíe esta información, pero pensé que era mi deber comunicársela, para que usted pueda actuar como corresponda».

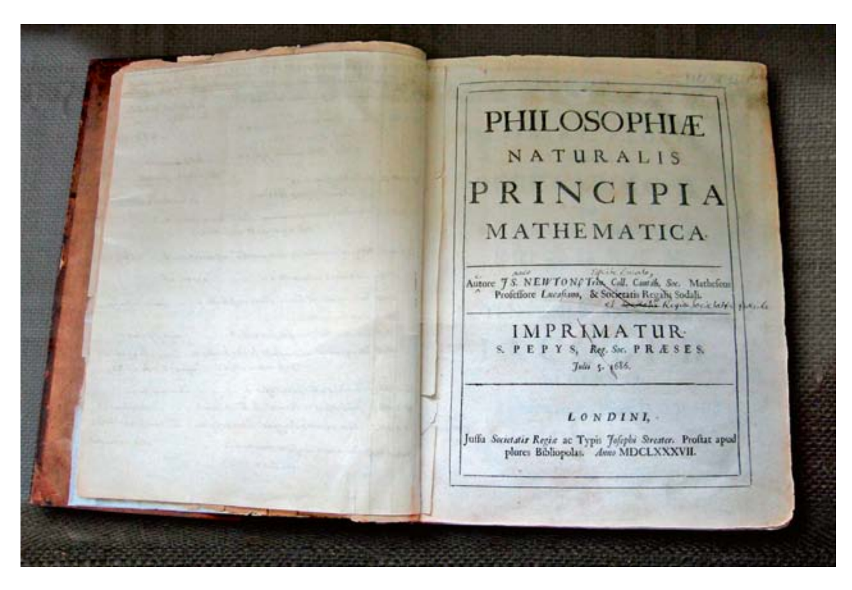
Conocía bien Halley a Newton, quien en su respuesta (27 de mayo) se extendía en explicaciones de que no debía nada a Hooke: «En los papeles que usted tiene en sus manos, no hay ninguna proposición de la que él pueda pretender [ser responsable]». En su obvia irritación, Newton no aludía para nada al manuscrito de los *Principia*.

El 7 de junio, Halley enviaba a Newton «una prueba del primer pliego de su libro, que pensamos imprimir en este papel y con estos caracteres; si tiene usted alguna objeción, se cambiará; y si lo aprueba, continuaremos». Resulta, sin embargo, que Newton no había enviado más que una parte de lo que debía ser su libro y por ello Halley le pedía «por favor, suminístrenos la segunda parte, o lo que queda de esta, tan pronto como la haya terminado; ya que la aplicación de esta parte matemática al sistema del mundo es lo que hará [al libro] aceptable a todos los naturalistas, al igual que a los matemáticos, y constituirá una gran ayuda para la venta del libro». Añadía, asimismo, que ya había corregido las pruebas que le enviaba, pero que no estaba seguro de si había advertido todos los errores. «Cuando ya haya pasado por sus ojos —añadía— no dudo de que estará libre de erratas. El impresor le pide excusas por los diptongos, que son de un tamaño un poco mayor, pero tiene algunos tipos del tamaño exacto. Al ser este pliego una prueba, no es tan clara como debería ser; pero la letra es nueva y he visto un libro de un tipo muy adecuado que fue la última cosa impresa con este tipo de letra; de manera que espero que la edición le satisfaga.»

El 20 de junio, Newton volvía a la carga con su polémica con Hooke, en una extensa carta al pobre Halley: «No es justo que me pida ahora que confiese a través de la imprenta ignorancia acerca de la proporción doble en los cielos por no otra razón que porque él me la haya dicho en el caso de los proyectiles, y así con fundamentos equivocados me acuse de esta ignorancia». Afortunadamente, en la última parte de su carta ya se refería a los *Principia*:

Me gustó mucho la prueba que me envió. He diseñado todo [el texto] para que esté compuesto de tres libros; terminé el segun-

do el verano pasado y es corto y solo resta transcribirlo y dibujar adecuadamente los grabados. Desde entonces he pensado en algunas proposiciones nuevas, que también puedo dejar fuera. Quiero que el tercero sea la teoría de cometas. El pasado otoño empleé dos meses en cálculos sin fruto por falta de un buen método, lo que me hizo volver al primer libro y ampliarlo con varias proposiciones relativas a cometas y otras a cosas diferentes que encontré el último invierno. Ahora pienso en suprimir el tercero. La filosofía es una señorita litigante tan impertinente que para un hombre es mejor ocuparse de asuntos de leyes que tener que ver con ella. Me di cuenta de esto antes, y ahora, nada más acercarme de nuevo a ella, me avisa. Los dos libros sin el tercero no llevarán tan bien el título de Philosophiae naturalis principia mathematica *y por consiguiente lo he cambiado a este,* De motu corporum libri duo*; pero después de pensármelo de nuevo retengo el título anterior. Esto ayudará a la venta del libro.*



EJEMPLAR DE LA PRIMERA EDICIÓN de los *Principia* con anotaciones manuscritas del propio Newton para la segunda edición.

© ANDREW DUNN/WIKIMEDIA COMMONS/CC BY SA 2.0

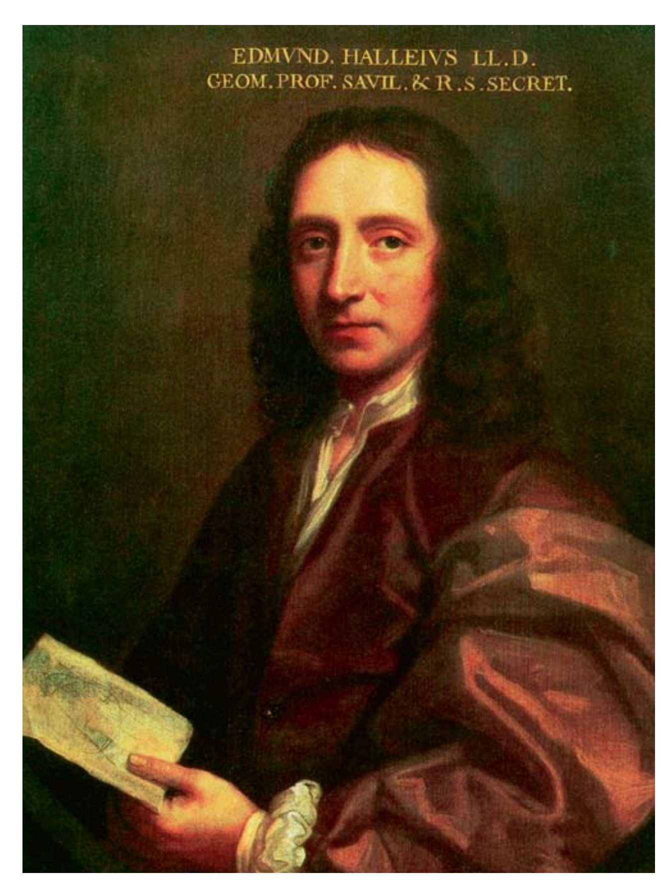
El asunto está claro: Newton, extremadamente molesto con las reclamaciones de Hooke, había decidido no incluir en su libro la tercera parte, lo que finalmente sería «El sistema del mundo», cuya discusión debería girar en torno a la ley de la gravitación universal (la ley del inverso del cuadrado de la distancia, precisamente la que era objeto de reclamación por parte de Hooke). Al recibir esta carta, Halley se alarmó y el 29 de junio escribía al susceptible Isaac:

Estoy profundamente apenado de que en este asunto, en el que toda la humanidad debería manifestar su deuda con usted, se encuentre con algo que le perturbe, o que cualquier disgusto le haga pensar en desistir de sus pretensiones a una señorita de cuyos favores usted tiene tantos motivos para alardear. No vea en esto sino la envidia de su felicidad que ostentan sus rivales, que pretenden perturbar su pacífico disfrute; cuando considere todo esto, espero que verá motivos para alterar su anterior resolución de suprimir su tercer libro, al no haber nada que usted pueda haber compilado en él por el que el mundo de los instruidos no esté preocupado, no sea que se les prive de ello; aquellos señores de la Sociedad a los que he informado están muy preocupados por ello, y porque este infeliz asunto le haya molestado...

Y continuaba con explicaciones acerca de cuáles eran las contribuciones reales de Hooke, para terminar rogándole «que no deje que su resentimiento sea tan grande como para privarnos de su tercer libro, con la aplicación de su doctrina matemática a la teoría de cometas y varios curiosos experimentos, que, según puedo imaginar a partir de lo que usted escribe, debe componerlo». (El que en varias ocasiones tanto Halley como Newton refiriesen que el Libro Tercero contenía la teoría de cometas está justificado en alguna medida en tanto que finalmente casi la mitad de esa parte de los *Principia* trataba del movimiento de los cometas, en los que las trayectorias elípticas están mucho más marcadas que en los planetas.)

Todo aquello calmó aparentemente la ira y las amenazas newtonianas, y el proceso siguió su camino. El 14 de octubre, Halley manifestaba a Newton que «debido a que usted no desea que su libro sea publicado antes del trimestre de Hillary [uno de los períodos lectivos en los que se dividía, y divide aún, la enseñanza en la universidad de Cambridge], la impresión no se ha acelerado todo lo que podría haberse hecho; pero espero que eso sea lo más correcto para proceder tan lentamente. Le envío con el carruaje que saldrá mañana por la mañana todos los pliegos que se han compuesto, deseando que quiera señalar todas las erratas que encuentre, de forma que, si hubiese alguna, el lector sea avisado, pero esto es decisión suya». Y a continuación trataba algunos detalles del contenido de la obra, señalando puntos que consideraba que no estaban claros ni eran totalmente correctos, cuestiones a las que Newton respondió el 18 de octubre, prometiendo, asimismo, leer las pruebas que acababa de recibir.

La siguiente carta que Halley recibió del catedrático lucasiano, en la que este se refería a los *Principia*, iba fechada el 13 de febrero de 1687, año en el que el libro finalmente aparecería. En ella le decía que tenía dispuesto el segundo libro desde otoño, pero que no se lo había enviado porque sabía que Halley había dejado sus labores en la secretaría de la Real Sociedad y esperaba noticias. Y añadía que le habían informado de que John Wallis «ha enviado algunas cosas sobre proyectiles bastante parecidas a las mías en los papeles que el Sr. Paget le enseñó a usted y que se le ordenó que debería consultarme sobre si pretendo imprimir las mías. Las he incluido al comienzo del segundo libro con otras de esa clase». Halley contestó el 24 de febrero. «Ahora —explicaba— no haré nada más hasta que todo esté terminado, lo que espero será poco después de Pascua; y para recuperar el tiempo que he perdido, emplearé otra imprenta que se ocupe de la segunda parte, la cual me complace saber que usted ha perfeccionado; por favor, envíemela lo antes posible. En cuanto la tenga pondré al impresor a trabajar en ella y no dejaré de cumplir con mi parte para que aparezca al mundo de



EDMUND HALLEY alrededor de 1687.

PINTURA DE THOMAS MURRAY/WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

manera que usted quede satisfecho. Me entristece que la Sociedad aparezca ante usted tan inestable y que piense que cambia con frecuencia, pero no sucede esto; y me enorgullece decir que les sirvo a su satisfacción.»

El 1 de marzo, Newton anunciaba a Halley que recibiría «el segundo libro el jueves por la noche o el viernes con el carruaje». Este llegó, efectivamente, tal y como Halley le informaba el 7 de marzo, al mismo tiempo que le notificaba que lo «pondría a imprimir, al haber acordado con uno [un impresor] que me promete tenerlo listo en 7 semanas, formando unos veinte pliegos. El primer libro tendrá alrededor de 30, que se terminarán aproximadamente al mismo tiempo. Esta semana tendrá el pliego 18, según solicitó».

A estas alturas Newton todavía no había entregado la tercera parte, que había amenazado con no incluir, y Halley se lo recordaba:

En este segundo [libro], menciona su tercer libro, De systemate mundi*, que a partir de primeros principios, que lo precedente ha establecido, no pueden sino proporcionar satisfacción universal. Suponiendo que esté preparado, y que no sea demasiado extenso como para que se imprima al mismo tiempo, envíelo si le parece bien. Me encargaré de que una tercera mano lo prepare, estando resuelto a no implicarme en ningún otro asunto hasta que todo esté hecho: deseando librarme de toda imputación de negligencia, en un asunto en el que estoy muy satisfecho de participar, para dar al mundo algo que todas las edades futuras admirarán.*

De nuevo era Halley quien escribía a Newton el 14 de marzo: «Ahora le he enviado el pliego 18 de su libro, pero no pude cumplir mi palabra debido a las extraordinarias complicaciones con el último pliego, que fue la razón por la que no fui capaz de terminarlo a tiempo de enviárselo la última semana. He querido intentar librarlo de erratas, pero me doy cuenta de que, a pesar de mi cuidado, algunas se habrán introducido, aunque espero que no sean importantes. Por favor, examínelo usted y señale qué errores se han cometido, de manera que se puedan señalar al final; si son muy importantes, se volverá a componer el pliego [...] Espero enviarle otros tantos pliegos en unos quince días y tener muy pronto terminada la primera parte».

Seguramente aliviado, el 5 de abril Halley comunicaba a Newton que «no he recibido la última parte de su divino tratado hasta ayer, aunque llegó a la ciudad hace una semana, debido a que he estado fuera de la ciudad la última semana. La primera parte estará terminada en tres semanas y considerando que el tercero es más breve que el segundo, la misma imprenta que hizo el primero lo hará tan pronto como el segundo esté terminado, pero encuentro algunas dificultades en que la letra sea exactamente la misma». Al igual que venía haciendo, Halley no se limitaba a cuestiones editoriales sino que continuaba su carta señalando algunas dificultades con, en este caso, el método que empleaba Newton para determinar la órbita de un cometa; mencionaba que, aunque no dudaba de que sus principios funcionarían, «una proposición o dos relativas a estas cuestiones añadirán mucho a la belleza y perfección de su teoría de cometas».

Y así, por fin, terminó la composición e impresión de *Philosophiae naturalis principia mathematica*, como comunicaba Halley a Newton el 5 de julio de 1687:

Honorable Señor,

Por fin he llevado su libro a su final y espero que le guste. Las últimas erratas llegaron justo a tiempo para insertarlas. Entregaré de su parte los libros que desea a la R. Sociedad, al Sr. [Robert] Boyle, al Sr. [Edward] Paget, al Sr. [John] Flamsteed y si hay alguien más en la ciudad a quien usted quiera gratificar de esta manera; le he enviado 20 ejemplares para que los regale a sus amigos de la universidad, le ruego que los acepte. En el mismo paquete recibirá 40 más que, al no tener a nadie conocido en Cambridge, le tengo que pedir que ponga en manos de uno o más de sus mejores libreros para que dispongan de ellos: pienso que el precio de los encuadernados en piel de vaca y con letras impresas sea aquí de 9 chelines; los queries *[cuadernillos que forman un libro, equivalente a 24 o 25 hojas de papel para escribir] que le envío los valoro en 6 chelines, para recuperar mi dinero según se vendan, o en 5 chelines de precio [si se paga inmediatamente o en poco tiempo]; porque pienso que no hay manera de tratar con libros sin interesar a los libreros y estoy dispuesto a que vayan a medias conmigo, en vez de que su excelente trabajo sufra con sus combinaciones. Espero que no se arrepienta de los esfuerzos que se ha tomado en una pieza tan loable, tanto para usted mismo como para el crédito de las naciones, y que, después de que se haya recuperado un poco con otros estudios, reanude esas consideraciones, en las que tanto éxito ha tenido, e intente perfeccionar la teoría lunar, que servirá de forma prodigiosa en navegación, al igual que de profunda y sutil especulación.*

Como vemos, Halley intentaba recuperar el dinero que había invertido en la edición los *Principia*, ocupándose también de la distribución, para la que pedía ayuda a Newton, por si conocía a algún librero adecuado en Cambridge. No obstante, las tareas de distribución resultaron ser demasiado complicadas para el esforzado Halley, que recurrió a un librero de Londres, Samuel Smith. No se sabe si Halley llegó a recuperar la inversión realizada.

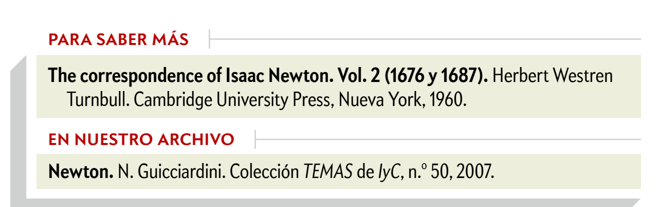
Tampoco sabemos exactamente cuántos ejemplares de los *Principia* se compusieron; parece que entre 300 y 400, cada uno a un precio, como vimos, de entre 9 y 5 chelines por 511 páginas. En un censo realizado en 1953 se identificaron 189 ejemplares existentes: 124 en Europa, 63 en Estados Unidos, 1 en Australia y 1 en Sudáfrica. Pronto fue un libro muy solicitado: en 1703, el ejemplar de Halley fue vendido por 2 libras, 3 chelines y 6 peniques, mientras que en 1707 un tal Sir William Browne se quejaba de haber tenido que pagar 2 guineas por uno. Nada comparable, sin embargo, con lo que sucedió en 1998, cuando la casa de subastas Christie's sacó a la venta un ejemplar. El precio de partida fue de 80.000 dólares, y se vendió por 321.500.

El manuscrito de los *Principia*, por cierto, ha sobrevivido: se encuentra en la biblioteca de la Real Sociedad. Aunque contiene correcciones debidas a las plumas de Newton y de Halley, sus 460 páginas no fueron escritas por Newton, sino por su amanuense, Humphrey Newton, con el que, a pesar de lo que pueda sugerir el apellido común, no le unía ningún parentesco.

Al menos en esta ocasión, el casi siempre egoísta e indiferente a los sentimientos ajenos Newton reconoció los esfuerzos de Halley. En el «Prefacio al lector» que incluyó en los *Principia* escribió:

En la publicación de este trabajo, Edmond Halley, un hombre de la mayor inteligencia y de saber universal, fue una ayuda enorme; no solo corrigió los errores tipográficos y controló la preparación de los grabados de madera, sino que fue él quien me inició en el camino hacia esta publicación. Desde que hubo obtenido mi demostración de la forma de las órbitas celestes, nunca dejó de pedirme que lo comunicase a la Real Sociedad, y su subsiguiente ánimo y amable patronazgo me llevaron a pensar en publicarlo.

Tras la primera edición de 1687 hubo una segunda, que apareció entre el 11 y el 14 de julio de 1713, en la que Roger Cotes (1682-1716) desempeñó un papel similar a Halley (editor, pero sin arriesgar su dinero), y luego una tercera (31 de marzo de 1726) a cargo de Henry Pemberton (1694-1771). Las dos fueron revisadas por Newton, que introdujo cambios, y las dos se escribieron aún en latín (la primera edición en inglés apareció en Londres en 1729). De la segunda se imprimieron 750 copias, y 1250 de la tercera, señal inequívoca de que el libro iba consolidándose como lo que en realidad fue desde el primer momento: una obra maestra de la ciencia. IyC



PARA SABER MÁS

The correspondence of Isaac Newton. Vol. 2 (1676 y 1687). Herbert Westren Turnbull. Cambridge University Press, Nueva York, 1960.

EN NUESTRO ARCHIVO

Newton. N. Guicciardini. Colección *TEMAS* de *IyC*, n.º 50, 2007.

LOS EJEMPLARES DE
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
FORMAN VOLÚMENES DE INTERÉS PERMANENTE

Disponibles las tapas del año 2018

Para efectuar tu pedido:

934 143 344

administracion@investigacionyciencia.es

www.investigacionyciencia.es/catalogo

Para que puedas conservar y consultar mejor la revista, ponemos a tu disposición tapas para encuadernar los ejemplares.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa fue reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



Sucesiones meta-Fibonacci

Estructuras fractales aún misteriosas pero fáciles de explorar con un simple ordenador

En su monumental obra *Gödel, Escher, Bach: Un eterno y grácil bucle*, publicada en 1979, Douglas R. Hofstadter presentó, adornada como un pequeño misterio, la sucesión Q. Aquel fue el primer ejemplo de «sucesión meta-Fibonacci». Aunque estas sucesiones gozan de una definición muy sencilla, exhiben un interesante grado de complejidad que sigue planteando numerosas preguntas a los matemáticos. ¿En qué consisten?

Recordemos que la famosa sucesión de Fibonacci queda definida a través de la siguiente relación de recurrencia:

$$F(n) = F(n{-}1) + F(n{-}2)\ ,$$

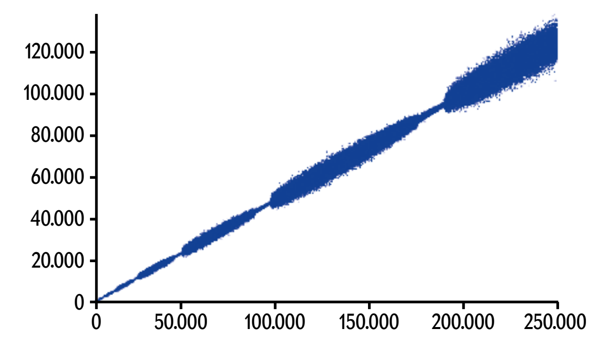
donde $F(n)$ denota el término n-ésimo de la sucesión: para generarlo, basta con sumar los dos términos anteriores. Ello implica que necesitamos dos condiciones iniciales para que la sucesión esté bien definida; en este caso, dichas condiciones son $F(1) = F(2) = 1$. Así pues, para computar el tercer término hacemos $F(3) = F(2) + F(1) = 1 + 1 = 2$. Aplicando esta relación de recurrencia obtenemos la sucesión de Fibonacci:

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34...

La sucesión Q de Hofstadter, etiquetada como A005185 en la Enciclopedia en Línea de Sucesiones de Enteros de Neil J. A. Sloane (On-Line Encyclopedia of Integer Sequences, oeis.org), se define también recursivamente:

$$Q(n) = Q(n - Q(n{-}1)) + Q(n - Q(n{-}2))\ ,$$

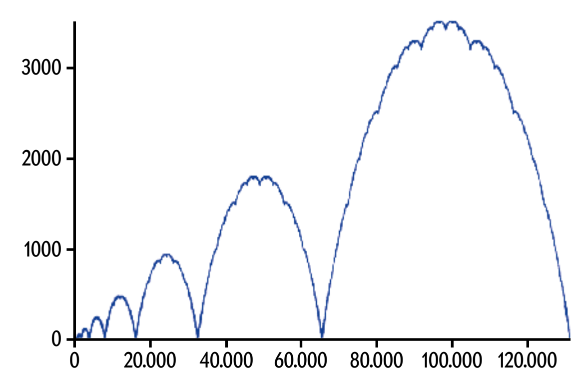
con condiciones iniciales $Q(1) = Q(2) = 1$. Al igual que antes, para generar un término dado sumamos dos términos previos. Pero ahora no son siempre los dos inmediatamente anteriores, sino los que ocupan las posiciones $n - Q(n{-}1)$ y $n - Q(n{-}2)$... ¡los cuales irán variando con los valores de la propia sucesión! A ello se debe que usemos el prefijo *meta-*.



1. SUCESIÓN DE HOFSTADTER: Esta gráfica muestra los primeros 250.000 valores de la sucesión Q de Hofstadter. La figura sugiere una estructura fractal que se repite en intervalos de potencias de 2.

¿Qué aspecto tiene esta endiablada sucesión? Para calcular el tercer término procedemos como sigue:

$$\begin{aligned} Q(3) &= Q(3 - Q(3{-}1)) + Q(3 - Q(3{-}2)) \\ &= Q(3 - Q(2)) + Q(3 - Q(1)) \\ &= Q(2) + Q(2) = 2\ . \end{aligned}$$



2. PROGRESIÓN FRACTAL: Gráfica de los primeros 131.072 (2^{17}) valores de la sucesión $C(n) - n/2$, donde $C(n)$ denota la sucesión de Conway.

Y aplicando una y otra vez esta recurrencia anidada obtenemos:

1, 1, 2, 3, 3, 4, 5, 5, 6, 6, 6, 8, 8, 8, 10, 9, 10, 11, 11...

A primera vista parece que la diferencia entre términos sucesivos vaya a ser siempre 0 o 1, y que la sucesión sea monótona creciente. No obstante, si ponemos atención veremos que $Q(12) = 8$ y que $Q(11) = 6$, de modo que la diferencia puede ser también 2. Y, un poco más adelante, nos encontramos con que $Q(15) = 10$ y $Q(16) = 9$, por lo que la diferencia puede también ser negativa. La sucesión no es monótona creciente. Si calculamos más términos, comprobaremos que la sucesión Q sigue mostrándose errática e impredecible. De hecho, revela una complejidad sorprendente si pensamos que las únicas operaciones que estamos empleando para generarla son simples sumas y restas.

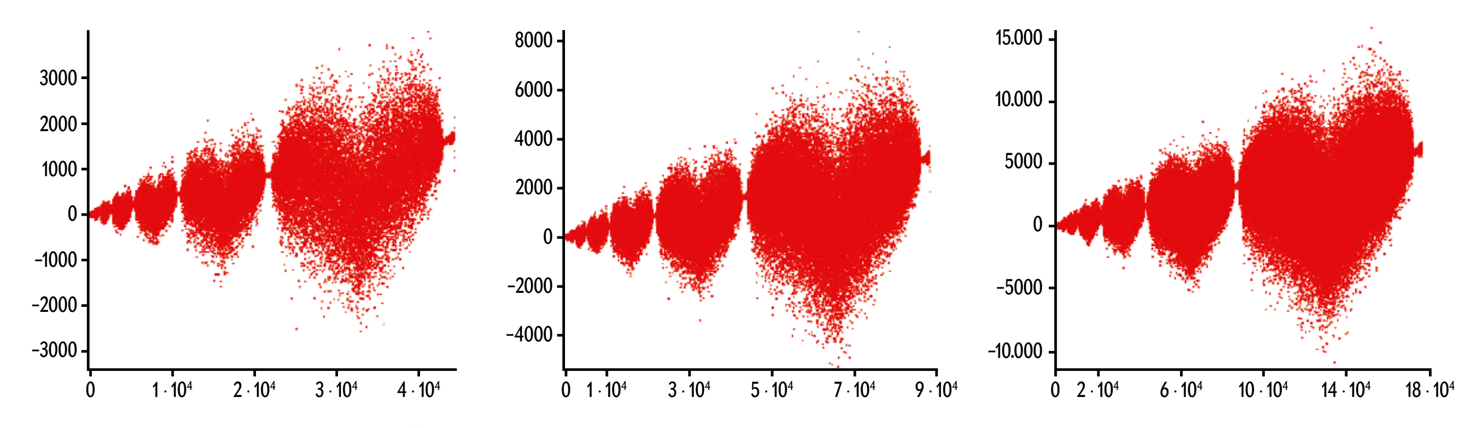
Al dibujar la gráfica de $Q(n)$ frente a n vemos que emerge cierto orden: como podemos apreciar en la figura 1, la sucesión parece crecer de manera cuasilineal con pendiente 1/2. En los años noventa, el matemático Simon W. Golomb demostró que si

$$\lim_{n\to\infty} Q(n)/n$$

existe, entonces dicho límite debe ser 1/2. Sorprendentemente, décadas después este límite condicional es una de las pocas propiedades de la sucesión Q que los matemáticos han podido demostrar de forma rigurosa.

De hecho, ni siquiera sabemos si $Q(n)$ existe para todos los valores de n. Ello se debe a que, si hubiera algún n para el que $Q(n{-}1)$ o $Q(n{-}2)$ fuesen mayores que n, obtendríamos un índice

ADAPTADO DE: «ON HOFSTADTER HEART SEQUENCES», ALTUG ALKAN, NATHAN FOX Y O. OZGUR AYBAR EN COMPLEXITY. VOL. 2017, ARTÍCULO 2614163, NOVIEMBRE DE 2017 [CC-BY-4.0]



3. UN REGALO PARA SAN VALENTÍN: Tres representaciones de la sucesión $H(n) = C(n) - Q(n)$ para $n > 3$, con las condiciones iniciales especiales $Q(1) = Q(2) = 2$, $Q(3) = 1$ (el valor del tercer término debe «forzarse») y $C(1) = C(2) = 1$, $C(3) = 2$. Las sucesivas gráficas corresponden a los primeros 45.000 valores aproximadamente (*izquierda*), 90.000 (*centro*) y 180.000 (*derecha*).

negativo carente de sentido y la sucesión moriría allí. Solo contamos con la prueba numérica de que eso no ocurre hasta $n = 1{,}2 \times 10^{10}$, pero hasta ahora nadie ha demostrado que la sucesión no se extinga más adelante.

Si volvemos a la figura 1, además de la tendencia lineal observamos cómo las fluctuaciones se estructuran en bloques. Los experimentos numéricos apuntan a que esos bloques empiezan y acaban en potencias sucesivas de 2, donde el bloque k-ésimo ocupa el intervalo $[2^{k-1}, 2^k]$. La sucesión parece exhibir fractalidad estadística: cada bloque es una copia ruidosa y el doble de grande que el anterior.

La sucesión de Conway

La sucesión Q no es la única sucesión meta-Fibonacci bajo escrutinio matemático. Otros ejemplos son la sucesión de Conolly (A046699), la de Tanny (A006949), la de Golomb (A001462), la de Mallows (A005229) o la sucesión V (A063882).

Veamos ahora la conocida como «sucesión de los 10.000 dólares» de Hofstadter-Conway (A004001). Esta se genera a través de la recurrencia anidada

$$C(n) = C(C(n-1)) + C(n - C(n-1))$$

con valores iniciales $C(1) = C(2) = 1$. Sus primeros términos son los siguientes:

1, 1, 2, 2, 3, 4, 4, 4, 5, 6, 7, 7,
8, 8, 8, 8, 9, 10, 11, 12, 12...

Su curioso nombre se debe al extraordinario matemático John H. Conway, que en 1988 había demostrado la siguiente propiedad:

$$C(n)/n \geq 1/2$$

(cumpliéndose la igualdad si n es una potencia de 2) y que, en este caso sí,

$$\lim_{n \to \infty} C(n)/n = 1/2 \, .$$

Conway ofreció un premio de 10.000 dólares a quien hallara un valor k para el cual

$$C(n)/n - 1/2 < \; 1/20$$

para todo $n > k$. A las pocas semanas, el matemático Colin L. Mallows demostró que $n = 1489$ cumplía los requisitos. Más rápido todavía se desdijo seguidamente Conway, al asegurar que el premio que había propuesto era de 1000 dólares, no de 10.000. Mallows se lo tomó deportivamente eximiéndolo del pago.

La sucesión de Conway crece de manera cuasilineal y muestra estructuras que parecen repetirse con distintos tamaños en los intervalos $[2^{k-1}, 2^k]$. Sin embargo, ha resultado más fácil de analizar que Q. Si representamos $C(n) - n/2$, aparece con claridad su maravillosa estructura fractal, la cual se muestra en la figura 2.

La gráfica revela una serie de «saltos de rana» simétricos, cada uno de los cuales se asemeja a una función de Takagi (aunque recordemos que esta última es continua, *véase* «Monstruos no derivables», por Bartolo Luque; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2019) y puede generarse aumentando adecuadamente la escala del salto anterior.

Corazones caóticos

Hemos visto que la sucesión Q vive en las inmediaciones de $n/2$ y que la sucesión C nunca se zambulle por debajo de ese valor. Además, ambas exhiben fractalidad estadística en los bloques que ocupan los intervalos $[2^{k-1}, 2^k]$. Aprovechando estas propiedades, en 2017 los matemáticos Altug Alkan, Nathan Fox y Ozgur Aybar definieron la «sucesión de los corazones caóticos de Hofstadter» (A284019) como la diferencia entre las sucesiones C y Q, es decir:

$$H(n) = C(n) - Q(n) \, .$$

El resultado que se obtiene al dibujarla es sorprendente y entrañable: los bloques aparecen como una sucesión fractal de corazones que doblan su tamaño a medida que avanzamos. En la figura 3, la primera gráfica muestra los primeros 45.000 valores de H; la segunda incluye el doble de valores (lo que implica la aparición de un nuevo corazón, que dobla en tamaño al anterior), y la última exhibe la misma cardiogeneración al doblar de nuevo el número de valores hasta 180.000.

Más allá de que este San Valentín pueda usar la sucesión H para tener un detalle friki con su pareja, me gustaría acabar apuntando que las sucesiones meta-Fibonacci son objeto de investigación activa y que son muy pocas las certezas que los matemáticos han podido demostrar sobre ellas. Sin embargo, son al mismo tiempo sencillas de generar por ordenador, por lo que constituyen un excelente campo para la exploración por parte de no especialistas. Seguro que aparecen muchas perlas como los corazones fractales de Alkan, Fox y Aybar. ¡Suerte!

PARA SABER MÁS

Gödel, Escher, Bach: Un eterno y grácil bucle. Douglas R. Hofstadter. Tusquets, 1987.
Conway's challenge sequence. Colin L. Mallows en *The American Mathematical Monthly*, vol. 98, págs. 5-20, enero de 1991.
On Hofstadter heart sequences. Altug Alkan, Nathan Fox y O. Ozgur Aybar en *Complexity*, vol. 2017, artículo 2614163, noviembre de 2017.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Inversión temporal para la telefonía 5G

Revertir la secuencia temporal de una onda permite focalizar señales en el espacio y en el tiempo. Esta técnica aumentaría el rendimiento de la telefonía móvil y reduciría el consumo de energía en la Red

Se espera que en 2020 se ponga en marcha la tecnología de quinta generación (5G) de telefonía móvil, la cual tendrá por objeto afrontar el aumento de un tráfico de información que se ha multiplicado por mil en apenas diez años. A tal fin, se pretende conseguir tiempos de latencia de un milisegundo y velocidades de carga de 20 gigabits por segundo, y todo ello con un gasto de energía muy reducido. ¿Cómo responder a este desafío? Una de las posibles soluciones se basa en un método concebido en los años noventa del siglo xx: la inversión temporal de las ondas.

En la telefonía móvil, una estación base y un aparato de teléfono intercambian información digitalizada y codificada en forma de ondas electromagnéticas. Pero, a pesar de su implantación y desarrollo, las técnicas actuales adolecen de varias limitaciones.

La primera obedece a que la antena de la estación emite prácticamente de la misma forma en todas las direcciones. Por tanto, solo una exigua fracción de la potencia emitida llega al aparato receptor, lo que implica malgastar la mayor parte de la energía radiada.

La segunda limitación se debe a que, en un entorno congestionado, como el de una ciudad, los obstáculos presentes pueden absorber, reflejar o dispersar las ondas emitidas. Ello provoca una atenuación adicional de la onda, pero, sobre todo, hace que aparezcan numerosos caminos



CAMINOS MÚLTIPLES: En un ambiente urbano abundan los obstáculos a la propagación de las ondas electromagnéticas. Una señal emitida por una antena de telefonía móvil puede ser dispersada, absorbida o reflejada con facilidad. Cuando llega a su destino, lo hace en forma de múltiples señales que han seguido caminos diferentes (*rojo*).

BRUNO VACARO (*ilustraciones*); https://recherche.orange.com, projet trimaran (*esquemas*)

de propagación entre la antena y el móvil. Esto último se traduce en interferencias entre las distintas ondas, especialmente a la altura del receptor. De esta manera, cuando el número de trayectos es elevado, basta con que la posición del móvil cambie levemente para que la señal recibida se modifique de manera drástica, llegando incluso a cortar la comunicación. Esa multiplicidad de trayectos se traduce asimismo en la recepción de numerosos «ecos» correspondientes a los distintos caminos de propagación, lo que a su vez conlleva un desfase de las señales (para una diferencia de recorridos de 30 metros entre dos caminos, por ejemplo, las señales se desfasan en 0,1 microsegundos). Todo ello merma el rendimiento de la transmisión.

Por último, un tercer inconveniente procede de que las ondas empleadas hoy en día presentan frecuencias comprendidas entre los 0,7 y los 2,6 gigahercios (GHz), con un ancho de banda del orden de 10 megahercios (0,01 GHz). Sin embargo, Claude Shannon, uno de los padres de la teoría de la información, nos enseñó que el caudal de información que puede transportar una señal es proporcional a su ancho de banda. Pero, dado que el espectro electromagnético se halla muy congestionado en el dominio de las frecuencias en cuestión, los anchos de banda actuales no pueden aumentarse más, lo que también reduce el rendimiento de las comunicaciones.

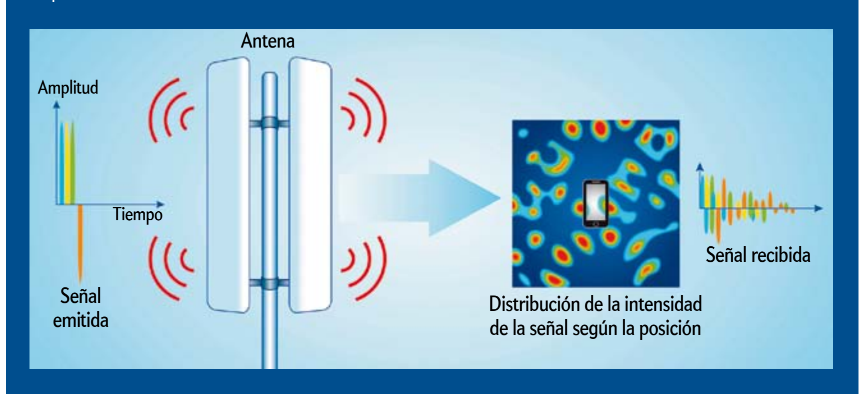
Aumentar la frecuencia

Así pues, para cumplir con las especificaciones 5G resulta crucial aumentar el ancho de banda, lo que implica adoptar frecuencias más elevadas y menos congestionadas. A tal fin se considera la banda de 3,5 ± 0,1 GHz, así como la de 26 GHz. Sin embargo, esto corre el riesgo de reducir el alcance de la antena, ya que, cuanto mayor es la frecuencia de una onda, tanto más sufre esta la reflexión o dispersión por parte del entorno. Y, con longitudes de onda pequeñas (poco más de un centímetro a 26 GHz), las variaciones espaciales de la señal a causa de las interferencias no podrán sino aumentar.

Una solución a esta dificultad la aporta la técnica MIMO, acrónimo inglés de «múltiple entrada y múltiple salida», la cual hace del defecto virtud y convierte en una ventaja la existencia de interferencias: varias antenas emiten en dirección al teléfono móvil, ajustando la forma de las ondas y el retraso entre emisiones a fin de que las diferentes señales lleguen

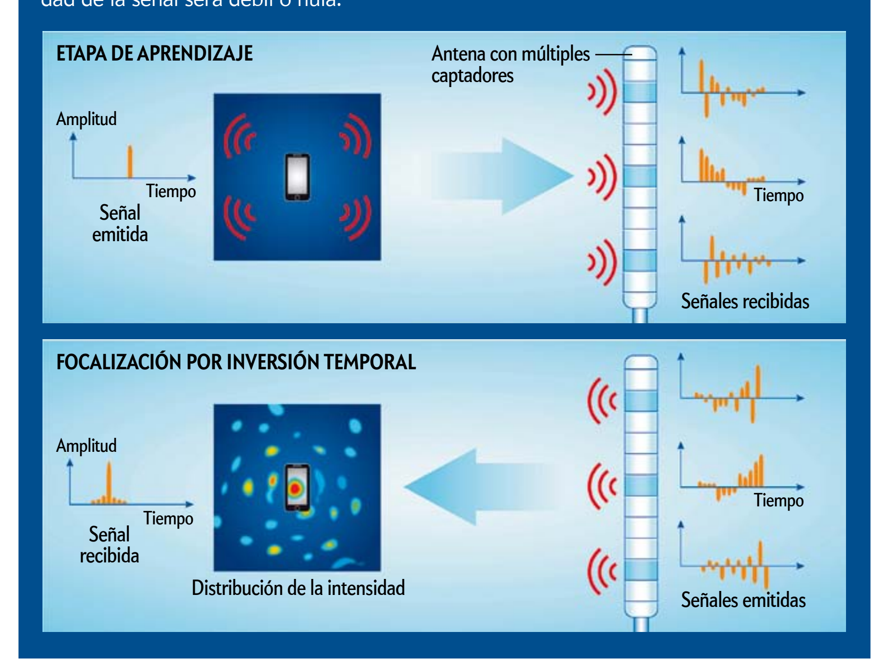
OBSTÁCULOS E INTERFERENCIAS

El esquema inferior ilustra la interferencia de una señal de 4 bits (1-1-1-0, *azul, amarillo, verde, naranja*) que, tras ser emitida por una antena y atravesar un entorno con abundantes obstáculos, llega hasta un teléfono móvil situado a decenas o centenas de metros. Debido a los numerosos trayectos seguidos por la onda y a los desfases temporales que se producen a la llegada, el teléfono capta una sucesión de «ecos» cuyos bits se entremezclan. Ello obliga a que los bits emitidos estén lo suficientemente bien separados en el tiempo, lo que limita el rendimiento de la comunicación. Además, las interferencias de todos esos ecos generan una señal cuya intensidad puede variar de manera considerable dependiendo de dónde se mida.



EMISIÓN FOCALIZADA MEDIANTE INVERSIÓN TEMPORAL

La inversión temporal de las ondas electromagnéticas puede aprovecharse para que una antena de telefonía focalice su señal en el teléfono de destino y solo en este. El método requiere una primera etapa de «aprendizaje» (*arriba*) en la que los distintos captadores de una antena graban de manera independiente una señal emitida por el teléfono. La señal recibida cambiará en función de la posición del captador, ya que el trayecto seguido por la onda hasta cada uno nunca será el mismo. Después, para emitir un bit focalizado hacia el teléfono de destino, basta con que cada captador invierta la señal grabada y la reemita (*abajo*). De esta manera, las ondas que lleguen al teléfono darán lugar a una señal focalizada en el tiempo y próxima a la original. Lejos de él, la intensidad de la señal será débil o nula.





a la vez al receptor e interfieran de manera constructiva.

Con longitudes de onda aún menores se puede disminuir el tamaño de las antenas y construir dispositivos que integren varias de ellas. Tales antenas pueden incluso comunicarse con numerosos móviles de manera simultánea superponiendo las señales enviadas a cada uno. Cuando el entorno está congestionado, las partes de la señal dirigidas a un teléfono dado y procedentes de antenas distintas interfieren de forma destructiva a la altura de los otros móviles.

En la implementación habitual de un MIMO «masivo», se miden primero las características de los enlaces entre cada antena emisora y cada receptor, y después se determinan las señales que deben emitirse con ayuda de los algoritmos adecuados. Sin embargo, ello consume tiempo de cálculo y solo tiene verdadero sentido para anchos de banda reducidos.

Reemitir la señal recibida

Otra solución se basa en aprovechar una propiedad de la propagación de las ondas: su simetría con respecto a la inversión del tiempo. La idea consiste en lo siguiente. Imaginemos una fuente completamente rodeada de terminales receptores. La fuente emite una señal y cada terminal graba la señal recibida; después, si estas reemiten las señales grabadas pero invirtiéndolas en el tiempo (como cuando rebobinamos una película de cine), las ondas seguirán el camino contrario y volverán a focalizarse a la altura de la fuente.

Esta manera de proceder parece necesitar una superficie completa de receptores. Sin embargo, en los años noventa del siglo xx, el equipo de Mathias Fink, de la Escuela Superior de Física y Química Industriales de París, demostró que, cuando el medio de propagación es lo suficientemente complejo, un número limitado de antenas basta para preservar la focalización. Los físicos demostraron que el procedimiento podía aplicarse a ondas electromagnéticas de 2,4 GHz. Y, en 2016, los ingenieros de la compañía Orange presentaron un prototipo de antena 5G con inversión temporal.

¿Cómo funciona esta antena? En una etapa de «aprendizaje», el móvil emite un impulso breve. Este llega hasta los múltiples captadores de una antena en forma de sucesión de ecos (uno diferente para cada captador), los cuales se graban. Esta etapa resulta clave y requiere un ancho de banda amplio, ya que debe garantizarse un buen muestreo de la señal y una buena separación de los distintos ecos. De esta manera sabremos que, si cada captador de la antena reemite la señal recibida invirtiéndola en el tiempo, a la altura del móvil se focalizará un impulso breve y casi idéntico al inicial.

Para transmitir datos numéricos de la estación al móvil, por convenio se emite la señal grabada invertida temporalmente para codificar el bit 1, o la misma señal multiplicada por −1 (su opuesta) para el bit 0. De nada sirve esperar al fin de la emisión de una grabación para empezar otra: basta con que ambas se hallen desfasadas por una duración superior a la del impulso original para que puedan diferenciarse a la altura del móvil. Además, puede aprovecharse la focalización espacial para emitir de manera simultánea las señales grabadas de varios móviles u objetos conectados: cada uno recibirá la señal que le estaba destinada y solo esta. En consecuencia, resulta posible aumentar el rendimiento de manera considerable y reducir en gran medida la energía consumida por la red, ya que la focalización espacial asegura una mayor eficiencia energética.

Ante tales perspectivas, ¿será elegida la inversión temporal para la telefonía 5G? No es seguro. Sus prestaciones deben mucho a la complejidad del entorno de propagación, y se enfrentan a la necesidad de renovar la fase de aprendizaje cuando los caminos de propagación se modifican, lo que en particular sucede cada vez que el aparato se desplaza. Si bien ello no supondría un problema para un peatón, sí lo sería para un vehículo en marcha. Con todo, los ingenieros no han dicho aún la última palabra: hace relativamente poco, la compañía Orange anunció un dispositivo que parecía funcionar incluso en las líneas de tren de alta velocidad. IyC

PARA SABER MÁS

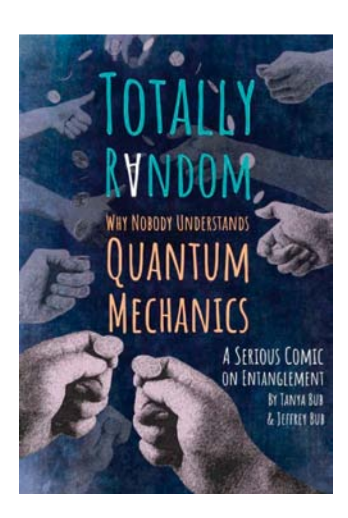
Time reversal of wideband microwaves. Geoffroy Lerosey et al. en *Applied Physics Letters*, vol. 88, art. 154.101, 2006.

Why time reversal for future 5G wireless? Yan Chen et al. en *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, págs. 17-26, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El salto de la tercera generación. Leander Kahney en *IyC*, diciembre de 2000.

Antenas adaptables. Martin Cooper en *IyC*, septiembre de 2003.



TOTALLY RANDOM
WHY NOBODY UNDERSTANDS QUANTUM MECHANICS (A SERIOUS COMIC ON ENTANGLEMENT)
Tanya Bub y Jeffrey Bub
Princeton University Press, 2018

Confusión cuántica

Tópicos peligrosos en la divulgación de la física cuántica

En su brillante cómic «La charla» [Investigación y Ciencia, julio de 2017], el gran Scott Aaronson, investigador de la Universidad de Texas en Austin y uno de los mayores expertos mundiales en la materia, nos advertía humorísticamente de que «si usted no habla con sus hijos de computación cuántica, otros lo harán» y les dirán cosas como «la computación cuántica y la consciencia son ambas extrañas y por tanto equivalentes». La tira cómica de Aaronson (ilustrada por el célebre Zach Weinersmith) es un ejemplo maravilloso de cómo se puede combinar rigor, humor y eficacia en la divulgación de la física cuántica. Sin duda, *Totally random: Why nobody understands quantum mechanics* (*a serious comic on entanglement*) intenta seguir sus pasos, y lo cierto es que lo consigue en cuanto al humor, ya que los autores, Tanya y Jeffrey Bub, son muy ingeniosos y así lo demuestran a lo largo de todo el libro. Pero ¿qué ocurre con el rigor y la eficacia?

El asunto empieza mal ya desde el título, que se hace eco de la célebre *boutade* de Richard Feynman: «Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica». Las malas citas, sacadas de contexto y sin conocer la fuente original, son una de las plagas de nuestros tiempos y lo infectan absolutamente todo, desde las transparencias de los científicos hasta los atriles de los políticos. En este caso —¡una excepción!—, al menos es cierto que Feynman pronunció esas palabras. Pero ¿seguro que quería decir lo que parece que quería decir? Si saben inglés, pongan «Richard Feynman why» en YouTube y prepárense a disfrutar durante siete minutos. Aunque, ¿quién tiene espaciotiempo hoy en día para estos matices?

Tras este mal comienzo, lo cierto es que el primer capítulo, que explica las características básicas del entrelazamiento cuántico, es claramente lo mejor del libro: muy detallado, pedagógico, riguroso e igual de divertido que el resto.

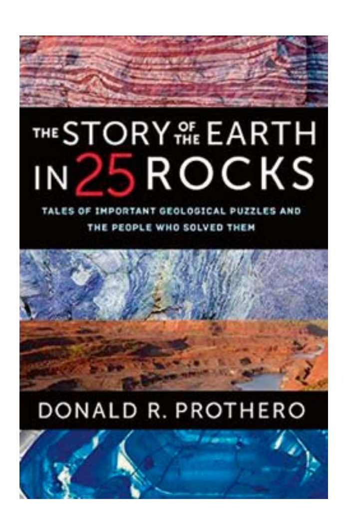
Sin embargo, en el segundo los autores deciden aventurarse en el jardín intelectual de eso que se llaman interpretaciones de la física cuántica, y no pueden evitar someter al lector al calvario habitual: David Bohm (con quien Jeffrey Bub colaboró en los años sesenta del siglo pasado) y sus variables ocultas; Hugh Everett y sus muchos mundos, que empiezan ya a ser demasiados; Einstein como Pepito Grillo; el gatito de Schrödinger... e incluso los desvaríos de Eugene Wigner y John von Neumann sobre la consciencia. Todo en pie de igualdad, en cambalache. Parece mentira, pero pasan las décadas, se acumulan las montañas de experimentos [*véase* «Acción fantasmal», por Ronald Hanson y Krister Shalm; *en este mismo número*], y los divulgadores parecen seguir resistiéndose a afrontar estos temas con una visión más moderna y acorde con los resultados. El capítulo termina en una gran confusión, donde se nos viene a decir que el debate sigue abierto en la actualidad exactamente en los mismos términos que hace décadas. Increíblemente, esto intenta apoyarse en una encuesta informal realizada durante un congreso en 2013, cuyos resultados muestran, en realidad, que la mayor parte de la comunidad sigue la interpretación de Copenhague o alguna de sus variantes modernas, mientras que, por ejemplo, la teoría de Bohm es seguida por el 0 por ciento de los asistentes. Otro ejemplo más de «falso balance», uno de los problemas más comunes en la divulgación científica.

Aun así, admitamos por un momento esta visión según la cual los físicos seguimos sin ponernos de acuerdo sobre una teoría que en el fondo no entendemos muy bien. Entonces, ¿cómo es posible que estemos haciendo ordenadores cuánticos y desarrollando otras tecnologías? Para resolver esta dificultad evidente, los autores acuden a una ocurrencia bastante pobre del físico Nicolás Gisin, según la cual los ingenieros serían personas que no entienden muy bien lo que están haciendo. Y, por extensión, debido a que esta cita se coloca justo al comienzo del capítulo sobre tecnología cuántica, parece que la opinión que los autores quieren comunicar al lector es que la parte de la comunidad científica dedicada a impulsar este tipo de tecnología estaría formada por «ingenieros», en ese sentido ligeramente despectivo y arrogante de la cita de Gisin. Aceptaríamos de buen grado la provocación si este capítulo final fuera una aproximación mínimamente seria al campo de las tecnologías cuánticas. Por desgracia, los autores se limitan a presentar dos juguecitos ingeniosos: uno sobre criptografía y otro sobre computación cuántica, pero no queda del todo claro su relación con lo que en realidad se hace en esos dos campos de investigación, ni el enorme impacto que estas nuevas tecnologías podrían tener en un futuro no muy lejano.

Por último, los autores cierran la tercera parte con el teletransporte cuántico, donde además del ya inevitable «beam me up, Scotty» (una de las citas falsas más célebres de la historia), se nos habla de un «teletransportador de almas» (una nueva tergiversación de una *boutade*, esta del físico Asher Peres) y se mezcla de manera deliberadamente poco rigurosa la idea del teletransporte cuántico con la de *Star Trek*. El hecho de que el teletransporte aparezca al final del libro, cuando una ordenación lógica lo habría situado mucho antes, y de que sea tratado de manera tan sensacionalista, se debe únicamente a que los autores tienen preparada una última ocurrencia: teletransportar a los personajes de vuelta a la página uno. Muy ingenioso, pero el lector se queda sin un final que merezca tal nombre y sin las siempre necesarias conclusiones.

Nosotros, en cambio, sí nos tomaremos el trabajo de concluir: estamos ante un libro que puede ser un pasatiempo divertido para los ya iniciados, pero aquellos que no sepan mucha física cuántica harían mejor en permanecer alejados... y esperar a que Aaronson se anime a hacer otro cómic.

—Carlos Sabín
Instituto de Física Fundamental
CSIC



THE STORY OF THE EARTH IN 25 ROCKS
TALES OF IMPORTANT GEOLOGICAL PUZZLES AND THE PEOPLE WHO SOLVED THEM
Donald R. Prothero
Columbia University Press, 2018

Las grandes preguntas de la geología

La historia de la disciplina esculpida en roca

El reto que para la biología supone entender el origen de la vida lo entraña en geología la comprensión de las rocas primitivas, en especial las pertenecientes al eón Arcaico, hace de 4000 a 2500 millones de años. Era aquel un mundo muy diferente del que observamos hoy, con una tenue corteza continental muy caliente, conformada por microcontinentes o protocontinentes, que en nada se parecía a la corteza poderosa, extensa y fría de nuestros días. El suelo oceánico estaba constituido por lavas que emergían de erupciones de las profundidades de la corteza y del manto, unas lavas ricas en un olivino peculiar conocido por komatita que volverían a derramarse desde el Precámbrico; toda la lava del fondo marino moderno es de basalto.

Cada roca es una huella del pasado. Donald R. Prothero, de la Universidad Politécnica de California en Pomona y del Museo de Historia Natural del condado de Los Ángeles, sigue en el libro de cabecera el método introducido en *The story of life in 25 fossils*. Utiliza el registro fósil para responder a las cuestiones centrales de la ciencia geológica: la edad de la Tierra, la naturaleza de la deriva continental, la vida primigenia y la causa de la extinción de los dinosaurios, entre otras. Aporta el contexto histórico de cada pieza y presenta información sobre los individuos que hicieron posible el progreso de la disciplina, favorecidos en numerosas ocasiones por la fortuna del azar. La obra que se lee de un tirón y, no obstante, debe guardarse como un libro de consulta.

En muchas cuencas oceánicas encontramos formaciones de hierro bandeado, prueba de que la atmósfera no contó con oxígeno libre hasta la terminación del Arcaico. La Luna se encontraba mucho más cercana a la Tierra, lo que ejercía una atracción mareal fortísima que provocaba unas ondas mareales gigantescas que agitaban los mares someros del globo cada pocas horas. Mucho más curiosas eran las rocas sedimentarias, como las areniscas. En casi todas las rocas anteriores al Arcaico predominan las areniscas de cuarzo, uno de los minerales más comunes de la superficie de la Tierra.

El autor incorpora los últimos hallazgos científicos en breves relatos de perspectiva general y encaja el análisis de rocas específicas en un tapiz amplio de fenómenos geológicos de alcance global. ¿Qué hizo a Chipre la fuente de cobre más rica del mundo antiguo, convirtiéndola en teatro de numerosas batallas e invasiones? El cobre se minaba ya en la isla en el año 4000 a.C., arañando yacimientos de metal casi puro depositados a cielo abierto. Los propios chipriotas hallaron la fuente originaria de ese cobre de superficie: las ofiolitas de las montañas Troodos, en el centro de la isla.

En 1813, el francés Alexandre Brongniart acuñó el término *ofiolita*, derivado del griego *ophis*, «serpiente», para designar ciertas rocas halladas en los Alpes. En su mayoría, las rocas ofiolíticas comienzan siendo lavas marinas de basalto para luego metamorfosearse en serpentina, un tipo de roca que semeja la piel suave y brillante de la serpiente. El origen de las rocas ofiolíticas, aunque cartografiadas y descritas hace unos 150 años, no se descifró hasta los años sesenta del siglo pasado gracias a la revolución de la disciplina promovida por la teoría de la tectónica de placas: los geólogos se percataron de que cuando el suelo oceánico se abría a lo largo de una dorsal centrooceánica, el producto de esa separación sería una ofiolita y, en razón de esa misma teoría, las rocas formadas en el lecho marino terminarían en el relieve continental.

Al carbón mineral se refería Teofrasto con el término *anthrakes* en su libro *Sobre minerales*, del siglo IV antes de nuestra era. China explotaba minas de carbón mucho antes, desde el año 4000 a.C., para alimentar hornos y hogueras. Pero en torno al 1000 a.C. comenzó a utilizarlo para fundir el cobre. Cuando Marco Polo visitó Oriente de 1271 a 1295, contó a su vuelta que allí quemaban rocas negras que ardían como si fueran troncos. Había tanto carbón que las personas se bañaban hasta tres veces por semana, contaba. Hay pruebas de su uso en la Edad de Bronce inglesa, en yacimientos del tercer milenio antes de nuestra era. Los romanos lo minaron en Inglaterra, Escocia y Gales en torno al año 200.

En la segunda mitad del siglo XVIII, los hombres de la Ilustración estaban todavía influidos por el relato del Génesis y el episodio del diluvio universal. Giovanni Arduino y otros clasificaron la secuencia de los estratos en rocas «primarias» (rocas graníticas y metamórficas, como esquistos o gneis), formadas con la creación de la Tierra, y rocas «sedentarias», que cubrirían las anteriores y creaban lechos sedimentarios con estratos fosilíferos, a menudo plegados y deformados. Abraham Gottlob Werner, James Hutton y la mayoría de los naturalistas de la segunda mitad del siglo XVIII se embarcaron en la investigación científica de la Tierra. Trabajaron con un éxito limitado en Escocia, Alemania y otros lugares, y generalizaron la historia a gran escala del planeta basándose en pruebas limitadas. Hutton escribió que la Tierra no tenía vestigio de su comienzo. Tras el primer volumen de la obra de Charles Lyell *Principles of geology*, publicada en 1830, los geólogos convinieron en que la Tierra era inmensamente vieja. Pero ¿cuánto? ¿Cómo ponerle una cifra a la edad del planeta? El problema era correoso, pero no arredró a los científicos, que se las ingeniaron para encontrar una solución. El método preferido era considerar el espesor máximo de las rocas sedimentarias de la Tierra y calcular el tiempo invertido en su deposición.

Charles Darwin se hizo pronto con el primer volumen de la obra de Lyell. La aparición, en 1859, de *El origen de las especies* dejaba al descubierto su talón de Aquiles: la carencia de pruebas inequívocas de fósiles anteriores al Cámbrico,

el período que comenzó hace unos 550 millones de años y en el que hicieron acto de presencia animales multicelulares complejos, como los trilobites. Darwin se había familiarizado con las rocas y los fósiles del Cámbrico en 1831, al explorar Gales para su mentor de Cambridge, el geólogo Adam Sedgwick.

Tras varias propuestas de fósiles que resultaron falsas, se postuló en 1878 otra estructura interesante que habría de poner de manifiesto la ansiada vida buscada en el Precámbrico. Charles Doolittle Walcott descubrió en el valle del Hudson, cerca de los manantiales de Saratoga, un extenso saliente de estructuras estratificadas que semejaban cabezas de coles cortadas en láminas. Esas estructuras ya habían sido descubiertas y denominadas estromatolitos («roca estratificada», en griego). Pero aquellos especímenes eran singulares. Walcott, al abordarlos con rigor y método científico, los denominó *Cryptozoon* (en griego, «vida oculta»). El escrito de Walcott fue recibido con frialdad y escepticismo. Albert Charles Seward, autoridad máxima e indiscutida en paleontología, objetó que aquellas formaciones no representaban estructuras orgánicas, tejidos vegetales ni nada que no fueran unas capas normales erigidas por el crecimiento mineral.

Pero el avance de la ciencia se hizo imparable con nuevos hallazgos y nuevos tipos de estromatolitos: pilares abovedados, conos altos (*Conophyton*) o estratos convexos aplanados en el centro (*Collenia*). Estromatolitos de muy diversas formas fueron comunes en las rocas precámbricas de Siberia. La prueba contundente, sin embargo, llegó con la observación de estromatolitos vivos y en desarrollo en nuestros días. En Shark Bay, en Australia, se descubrieron en 1961 estromatolitos abovedados de un metro de alto y otras estructuras. La superficie estaba cubierta de un tapiz gelatinoso de bacterias de color azul verdoso. Se trataba de cianobacterias, procariotas sin núcleo diferenciado pero con la química interna necesaria para la fotosíntesis. Cuando mueren, dejan tras de sí una estructura de sedimento estratificado.

—Luis Alonso

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*

MITOS Y VERDADES DEL CEREBRO
LIMPIAR EL MUNDO DE FALSEDADES Y OTRAS HISTORIAS
Francisco Mora
Paidós, 2018
ISBN: 978-84-493-3498-6
224 págs. (18 €)



UN PEQUEÑO PASO PARA [UN] HOMBRE
LA HISTORIA DESCONOCIDA DE LA LLEGADA DEL HOMBRE A LA LUNA
Rafael Clemente
Cúpula, 2018
ISBN: 978-84-480-2494-9
328 págs. (19,50 €)



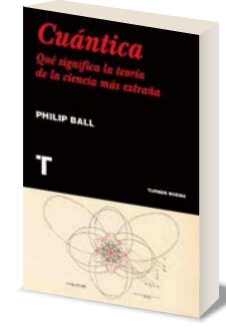


DEL MITO AL LABORATORIO
LA INSPIRACIÓN DE LA MITOLOGÍA EN LA CIENCIA
Daniel Torregrosa
Ediciones Cálamo, 2018
ISBN: 978-84-16742-11-0
208 págs. (18,90 €)



EL INGENIO DE LOS PECES
Jonathan Balcombe
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2938-3
344 págs. (21,90 €)

CUÁNTICA
CÓMO INTERPRETAR LA TEORÍA DE LA CIENCIA MÁS RARA
Philip Ball
Turner, 2018
ISBN: 978-84-17141-55-4
296 págs. (26,90 €)



LAS GEOMETRÍAS Y OTRAS REVOLUCIONES
Marina Logares
La Catarata y Editorial CSIC, 2018
ISBN: 978-84-9097-555-8
120 págs. (12 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

FEBRERO

1969

Las guerras de la evolución

«Al final de *El origen del hombre y de la selección en relación al sexo* (1871), Charles Darwin escribía: “La principal conclusión en la que desemboca este trabajo, a saber, que el hombre desciende de alguna forma de vida sencilla, desagradará muchísimo a no pocos, siento pensar así”. Al cabo de medio siglo, su pronóstico se cumplió del todo en EE.UU., donde muchas personas libraron la que a veces se conoce como “guerra del mono”. Fundamentalistas cristianos de varias confesiones, al creer que la evolución contradecía la Biblia, pretendieron contener la expansión del pensamiento evolucionista convirtiendo en delito su enseñanza. Hasta el 12 de noviembre del pasado año [1968] no pudo decirse que la guerra del mono había terminado, cuando el Tribunal Supremo de EE.UU. dictaminó la inconstitucionalidad de una ley que prohibía la enseñanza del evolucionismo en las escuelas e institutos públicos. La batalla más conocida de aquel conflicto ideológico tuvo lugar en 1925, cuando John Thomas Scopes fue juzgado en Dayton (Tennessee) por enseñar esa teoría. —L. Sprague de Camp.»

Hoy De Camp es más conocido como autor de ciencia ficción.

El motor rotativo Wankel

«El motor de combustión interna de pistones ha tenido tal éxito que nadie repara apenas en el pequeño ejército de inventores decididos a verlo remplazado por algún tipo de motor rotativo. En el motor de pistones la conversión del movimiento de vaivén lineal en movimiento rotatorio, mediante el dispositivo de bielas y cigüeñal, de por sí aprovecha poco la energía cedida por la combustión. Existen entre 30 y 40 de tales motores rotativos, todos “ideales” en mayor o menor grado (como el diseñado por Felix Wankel en 1956). Pero parece que aún persisten problemas para lograr una hermeticidad y una lubricación adecuadas, problemas que son característicos de prácticamente todos los motores rotativos.»



1969



1919



1869

1919

La catástrofe de la melaza

«¿Qué hay en la melaza que provoca su explosión, en especial en invierno, cuando ese pegajoso jarabe se torna proverbialmente viscoso? Hace dos semanas estalló en Boston un gran depósito de melaza, matando a una docena de personas e hiriendo a cincuenta más, sin que se haya conseguido una explicación del desastre del todo satisfactoria. El depósito era una enorme estructura cilíndrica de 7500 metros cúbicos de capacidad. De repente, sin señal previa, la cúpula salió lanzada al aire y los costados estallaron en pedazos. Los restos se esparcieron en todas las direcciones mientras un diluvio de melaza rociaba las ruinas y las calles, ahogando a muchos de los afectados.»



1919: La ruptura de un depósito de melaza provocó una enorme ola de fluido viscoso que arrasó el barrio de North End, en Boston.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

La enfermedad de las alambradas

«Agradecemos al doctor A. L. Vischer, de Basilea, su pequeño folleto dedicado a los prisioneros de guerra y especialmente a lo que se conoció como “enfermedad de las alambradas”. Entre cuatro y cinco millones de hombres se han mantenido confinados en países enemigos, y muchos de ellos retornarán a sus hogares con la mente afectada. El doctor Vischer traza el cuadro de un estado mental característico de los prisioneros de guerra, del cual la mayoría son víctimas al cabo de dos o tres meses y del que pocos se escapan por completo. Considera que las causas radican en la pérdida de libertad durante un tiempo incierto en compañía próxima de muchos otros. El resultado es un ansia persistente con una total incapacidad de acción. El factor de la soledad rodeada de compañía lo ilustra con escritos procedentes de distintos campos.»

1869

Una operación peligrosa

«El *Medical Report* informa del éxito de la transfusión de sangre efectuada por el doctor Enrico Albanese en el hospital de Palermo. El joven de diecisiete años Giuseppe Ginazzo, de Cinisi, fue ingresado con una amplia ulceración en la pierna, lo que al fin hizo necesaria la amputación. En esa emergencia, el doctor Albanese recurrió a la transfusión de sangre como el único remedio que aún no se había probado. A tal fin, dos ayudantes del hospital se ofrecieron para que les abrieran las venas, y así, en dos diferentes intervalos, se introdujeron 220 gramos de sangre en el organismo del paciente. Tras el primero recuperó el habla y manifestó que antes no podía ver ni oír pero se sentía como si volara por el aire. Ya está recuperándose bastante bien.»

Los grupos sanguíneos A, B y 0 no se descubrieron hasta 1900-1901.



EVOLUCIÓN
Adaptados a la actividad física
Herman Pontzer

A diferencia de nuestros primos simios, los humanos necesitamos realizar ejercicio para estar sanos.

ASTROFÍSICA
El primer mapa tridimensional de la Vía Láctea
Carme Jordi y Eduard Masana

La misión espacial Gaia está transformando nuestra imagen de la galaxia y su entorno cósmico.





MATEMÁTICAS
El código de las partículas
Matthew von Hippel

Los científicos están creando herramientas matemáticas para identificar nuevas partículas y nuevos fenómenos en el mayor acelerador del mundo.



SOSTENIBILIDAD
El último recurso
Richard Conniff

¿Podemos retirar suficiente CO_2 de la atmósfera para ralentizar e incluso invertir el cambio climático?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes, Simular la dinámica molecular mediante fotones y Acción fantasmal*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y Un fósil humano entre una multitud*; Marián Beltrán: *Estrategias para mejorar la formación de los profesores de ciencias*; José Óscar Hernández Sendín: *Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento*; Xavier Roqué: *Artesanos, técnicos y prácticos*; Bartolo Luque: *El nuevo lenguaje de las matemáticas*; Ana Mozo: *La endometriosis, un misterio doloroso*; Fabio Teixidó: *Infierno oculto*; J. Vilardell: *Inversión temporal para la telefonía 5G y Hace...*

Copyright © 2018 Scientific American Inc., 1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2019 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Revista de psicología y neurociencias

Enero / Febrero 2019 · N.º 94 · 6,90 € · menteycerebro.es

Mente&Cerebro

VIOLENCIA
Entrevista con Steven Pinker, psicólogo de Harvard

Psicología para la
PAZ
Estrategias psicológicas para poner fin a guerras y conflictos

Cáncer
Factores que reducen el riesgo de tumor cerebral

Maternidad
Plasticidad cerebral tras el parto

Evolución
El origen cultural de las habilidades numéricas

N.º 94
en tu quiosco



www.investigacionyciencia.es

administracion@investigacionyciencia.es

